

BEATRIZ HERTER POZZEBON

**Parâmetros de solos residuais compactados da Região  
Metropolitana de São Paulo – Comparação com dados de outras  
localidades no Brasil**

São Paulo  
2017

**BEATRIZ HERTER POZZEBON**

**Parâmetros de solos residuais compactados da Região  
Metropolitana de São Paulo – Comparação com dados de outras  
localidades no Brasil**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Mestre em  
Ciências.

Orientador:  
Prof. Dr. Faiçal Massad

São Paulo  
2017

**BEATRIZ HERTER POZZEBON**

**Parâmetros de solos residuais compactados da Região Metropolitana de São Paulo – Comparação com dados de outras localidades no Brasil**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia civil

Orientador: Prof. Dr. Faiçal Massad.

São Paulo

2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

Assinatura do autor: \_\_\_\_\_

Assinatura do orientador: \_\_\_\_\_

### Catálogo-na-publicação

Pozzebon, Beatriz Herter

Parâmetros de solos residuais compactados da Região Metropolitana de São Paulo – Comparação com dados de outras localidades no Brasil / B. H. Pozzebon, F. Massad -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

283 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1.solos residuais compactados 2.compressibilidade e deformabilidade  
3.parâmetro de pressão neutra 4.parâmetros de resistência ao cisalhamento  
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica II.t. III.Massad, Faiçal

Dedico este trabalho aos meus pais,  
Fátima e Nélvio,  
pelo apoio, incentivo e companheirismo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Faiçal Massad, por toda a orientação, paciência, disponibilidade, apoio e ensinamentos passados ao longo desta pesquisa;

Ao presidente da DERSA (Desenvolvimento Rodoviário S/A), a qual é detentora dos dados analisados, na pessoa de Laurence Casagrande Lourenço, pela autorização da utilização e publicação dos resultados;

À Planservi Engenharia, pelo incentivo e pela compreensão para o desenvolvimento das atividades ligadas ao mestrado;

Ao meu chefe, Maurício Yamaji, por toda a ajuda, incentivo, compreensão e pelos ensinamentos passados durante os anos de mestrado e de trabalho;

Aos colegas de trabalho: Débora, Fabiana, Luciane, Mariana, Mário, Michelle, Patrícia, Talita e Thais, pelas discussões técnicas ao longo do desenvolvimento do projeto do Rodoanel e pela revisão deste trabalho;

À EPUSP, pelo apoio à pesquisa.

Ao Professor Doutor Maurício Abramento e a Professora Doutora Maria Eugênia pela revisão e críticas a este trabalho;

Ao Professor Doutor Edvaldo Simões, pela amizade e incentivo ao longo da graduação e do mestrado;

Aos meus pais, Fátima e Nélvio, pelo apoio, carinho, incentivo e ajuda ao longo de toda minha vida acadêmica e profissional;

Aos colegas de mestrado, pelo companheirismo e ajuda ao longo destes três anos;

A todos os amigos e colegas, pelos momentos de distração, pelos conselhos e pela paciência ao longo desta caminhada;

A todos que participaram direta ou indiretamente destes anos de mestrado;

A todos vocês, muito obrigada!

*“A persistência é o caminho do êxito”.*

Charles Chaplin

## RESUMO

No Brasil, a partir do século XX, cada vez mais o transporte ferroviário foi sendo substituído pelo transporte viário. Por conta disso, a demanda por obras de infraestrutura viária é cada vez maior, tanto para transporte de pessoas, mas, principalmente, para transporte de cargas. Outro fator que indica a maior demanda por obras de infraestrutura é o crescimento da economia e da população.

A fim de garantir segurança na construção e, principalmente, na operação, são necessárias investigações geológicas-geotécnicas, para caracterizar e estimar parâmetros do material que estão sendo utilizados em obra, para prever seu comportamento.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento têm grande importância na condição de estabilidade dos aterros, tanto em fase de construção, em que também se sobressai o parâmetro de pressão neutra  $\bar{B}$ , quanto em fase de operação, enquanto os parâmetros de deformabilidade são essenciais na estimativa de recalques na fase operacional dos aterros

Este trabalho tem como objetivo apresentar estimativas dos parâmetros de resistência ao cisalhamento (ângulo de atrito e a coesão), de deformabilidade de compressibilidade, expansibilidade e de pressão neutra do material utilizado nos aterros dos lotes 14 e 15 do Rodoanel Norte em São Paulo. Os materiais estudados possuem diferentes litologias, entre as quais pode-se citar materiais provenientes de filitos, granitos, ultramilonitos e metabásicas. Assim, foi feito um levantamento dos dados de ensaios de laboratório disponíveis, a saber, ensaios de caracterização, de compactação Proctor Normal, ensaios triaxiais UU não saturado, CU saturado e PN e ensaios de adensamento edométrico. Os ensaios mecânicos foram feitos em amostras compactadas com desvios de umidade em relação à ótima variando entre 0% até 4 e mesmo 5%, mantendo o grau de compactação em torno de 95%.

Por fim, os parâmetros de resistência, deformabilidade, compressibilidade e pressão neutra estimados foram comparados por litologia com parâmetros encontrados na literatura técnica, podendo assim serem utilizados em outros projetos em regiões próximas ou que empreguem materiais de mesma origem ou litologia.

**Palavras-chave:** Solos residuais. Parâmetros de resistência. Deformabilidade. Compressibilidade. Expansibilidade. Parâmetro de pressão neutra.



## **ABSTRACT**

*In Brazil, from the twentieth century, the rail transportation was replaced by road transportation. Because of that, the demand for road infrastructure is increasing, for the transportation of people and for the freight transportation. Another factor that indicates the greater demand for infrastructure is the growth of the economy and the population*

*To guarantee safety in the construction and in the operation, geological-geotechnical investigations are necessary to characterize and estimate parameters of the material, that is being used in the civil works to predict its behavior.*

*The parameters of shear strength have a great importance in the condition of stability of the embankments, in construction phase, as the neutral pressure parameter,  $\bar{B}$ , and in phase of operation, while the deformability parameters are essential in the estimation of settlements in the operational phase of the embankments.*

*The objective of this dissertation is to present estimates of the parameters of shear strength (angle of friction and cohesion), deformability, expansibility, compressibility and neutral pressure of the material used in embankments of two parts of Rodoanel Norte in São Paulo. The studied materials have different lithologies: phyllite, granitic gneisses, ultramylonites and metabasites. Thus, a data survey of the laboratory tests results was done, namely, characterization tests, Normal Proctor compaction test, triaxial UU unsaturated, saturated CU and PN and oedometric densification tests. The mechanical tests were done on compacted samples with deviations of water content from the optimum ranging from 0% up to 4 and even 5%, maintaining the degree of compaction around 95%.*

*Finally, the estimation of the shear strength parameters, deformability, compressibility, expansibility and neutral pressure were compared by lithology with parameters found in the technical literature so that it can be used in other projects in nearby regions or using materials of the same origin or lithology.*

**Key-words:** *Residual soils. Shear strength parameters. Deformability. Compressibility. Expansibility. Neutral pressure parameter.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa rodoviário do Estado de São Paulo. ....	3
Figura 2 – Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. ....	4
Figura 3 – Perfil de intemperização.....	9
Figura 4 – Solos de alteração de rocha da região Centro-Sul do Brasil.....	10
Figura 5 – Perfis de intemperismo apresentados por Milton Vargas para solos residuais da Região Centro Sul do Brasil.....	11
Figura 6 – Afloramento de Metabásica, com presença de óxido de manganês nas foliações, na Região Metropolitana de São Paulo. ....	11
Figura 7 – Curva de compactação. ....	13
Figura 8 – Curvas de compactação para diversos tipos de solo e mesma energia. ....	14
Figura 9 – Curva de compactação de um solo com diferentes energias.....	16
Figura 10 – Peso específico seco máximo para diversos tipos de solo, em função da energia de compactação. ....	17
Figura 11 – Distribuição de íons adjacentes à uma superfície de argila, conforme o conceito de camada de dupla difusão. ....	19
Figura 12 – Estruturas de solos compactados.....	20
Figura 13 – Modelo de Lambe para esqueleto sólido de uma argila.....	21
Figura 14 – Pressões neutras e contrações volumétricas em solo compactado de Caolinita.....	22
Figura 15 - Permeabilidade em solos compactados.....	24
Figura 16 – Compressibilidade de solos compactados. ....	24
Figura 17 - Influência da Estrutura de Solos Compactados nas Relações Tensão-Deformação. ....	25
Figura 18 – Ensaio triaxiais do tipo UU em amostras compactadas da Higgins clay. Nota 1 psi $\approx$ 6,89 kPa.....	25
Figura 19 – Curvas de Tensão versus deformação para argilas siltosas em duas condições de compactação (estática e pisoteamento). Nota 1 kg/cm <sup>2</sup> $\approx$ 100 kPa. ....	26
Figura 20 – Definição das especificações de compactação de um aterro de acordo com o comportamento do solo. ....	27
Figura 21 – Áreas no contato de duas partículas. ....	30
Figura 22 – Medidas de pressão nos poros de uma barragem em Chalmers, durante o lançamento de 14 m de aterro. ....	31
Figura 23 – Envoltória de resistência com três trechos para solos compactados.....	33
Figura 24 – Envoltória de resistência para argilas.....	34
Figura 25 – Estado de tensões representado pelos círculos de Mohr (a) e pela trajetória de tensões (b). ....	34
Figura 26 – Base para demonstração geométrica da correlação entre as envoltórias da trajetória de tensões e do círculo de Mohr. ....	36
Figura 27 – Tendência de variação da resistência, em termos de tensão efetiva, com a umidade e densidade de compactação, para ensaios triaxiais CD ou CU. ....	37

Figura 28 – Curvas tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) e pressão neutra ( $u$ ) em função da deformação para três comportamentos típicos. Nota: $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ .....	39
Figura 29 – Curvas tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) e pressão neutra ( $u$ ) em função da deformação para três comportamentos típicos. Nota: $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ .....	40
Figura 30 – Trajetórias de tensões efetivas $p'$ e $q'$ . Nota $1 \text{ kg/cm}^2 \approx 100 \text{ kPa}$ . ....	41
Figura 31 - Parâmetro $\bar{B}$ versus tensão principal máxima, $\sigma_1$ . ....	45
Figura 32 – Parâmetro $\bar{B}$ versus variação entre umidade de compactação e umidade ótima. ....	46
Figura 33 – Desenvolvimento de pressões neutras na barragem de Limoeiro. ....	47
Figura 34 – Desenvolvimento de pressões neutras em um aterro compactado. ....	48
Figura 35 – Montagem do ensaio edométrico.....	49
Figura 36 - Gráfico de índice de vazios em função do logarítmico da tensão vertical obtido a partir do ensaio de adensamento. ....	50
Figura 37 – Cálculo do módulo de deformabilidade tangente inicial ( $E_i$ ) e do módulo de deformabilidade secante a 50% da tensão de ruptura ( $E_{50}$ ). ....	52
Figura 38 – Rodoanel Norte. ....	55
Figura 39 – Mapeamento geológico da região, com indicação do início e do fim do trecho em estudo. ....	56
Figura 40 – Amostra nº 7 (Granito milonitizado). ....	58
Figura 41 – Amostra nº 2 (Filito). ....	59
Figura 42 – Amostra nº 4 (Ultramilonito). ....	59
Figura 43 – Amostra nº 5 (Metabásica).....	60
Figura 44 – Afloramento de Filito. ....	60
Figura 45 – Afloramento de Granito Cantareira. ....	61
Figura 46 – Afloramento de Granito Milonitizado.....	61
Figura 47 – Afloramento de Metabásica. ....	62
Figura 48 - Curvas de distribuição granulométrica dos solos ensaiados, de acordo com a NBR 7181/84. ....	64
Figura 49 – Classificação do solo na Carta de Plasticidade de Casagrande. ....	65
Figura 50 – Resumo das curvas de compactação. ....	68
Figura 51 – Resumo das curvas de compactação – valores obtidos através de ensaios com as amostras 1 a 7 e valores da bibliografia (Tabela 3). ....	68
Figura 52 – Gráfico coesão efetiva ( $c'$ ) em função do desvio de umidade ( $\Delta h$ ) para ensaios triaxiais UU não saturado. ....	72
Figura 53 – Gráfico ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ) em função do desvio de umidade ( $\Delta h$ ) para ensaios triaxiais UU não saturado. ....	72
Figura 54 – Gráfico coesão efetiva ( $c'$ ) em função do desvio de umidade ( $\Delta h$ ) para ensaios triaxiais CU saturado. ....	73
Figura 55 – Gráfico ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ) em função do desvio de umidade ( $\Delta h$ ) para ensaios triaxiais CU saturado. ....	73

Figura 56 – Gráfico coesão efetiva ( $c'$ ) em função do desvio de umidade ( $\Delta h$ ) para ensaios triaxiais UU não saturado, com $\phi'$ fixo. ....	75
Figura 57 – Gráfico coesão efetiva ( $c'$ ) em função do desvio de umidade ( $\Delta h$ ) para ensaios triaxiais CU saturado, com $\phi'$ fixo. ....	75
Figura 58 – Gráfico $\phi'$ em função de IP, comparando com valores da bibliografia. ....	77
Figura 59 – Gráfico $c'$ em função do percentual de argila. ....	78
Figura 60 – Módulo de deformabilidade $E_{50}$ versus $\sigma_3$ – Amostra 1 – Filito/ Metabásica – Ensaio triaxial UU não saturado. ....	80
Figura 61 – Módulo de deformabilidade $E_{50}$ versus $\sigma_3$ – Amostra 2 – Filito – Ensaio triaxial UU não saturado. ....	80
Figura 62 – Módulo de deformabilidade $E_{50}$ versus $\sigma_3$ – Amostra 3 – Filito - Ensaio triaxial UU não saturado. ....	81
Figura 63 – Módulo de deformabilidade $E_{50}$ versus $\sigma_3$ – Amostra 4 – Ultramilonito – Ensaio triaxial UU não saturado. ....	81
Figura 64 – Módulo de deformabilidade $E_{50}$ versus $\sigma_3$ – Amostra 5 – Metabásica – Ensaio triaxial UU não saturado. ....	82
Figura 65 – Módulo de deformabilidade $E_{50}$ versus $\sigma_3$ – Amostra 6 – Ultramilonito – Ensaio triaxial UU não saturado. ....	82
Figura 66 – Módulo de deformabilidade $E_{50}$ versus $\sigma_3$ – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado – Ensaio triaxial UU não saturado. ....	83
Figura 67 – Módulo de deformabilidade em função da tensão confinante para amostras 1, 2 e 3 – Filito – Ensaio triaxial UU não saturado. ....	84
Figura 68 – Módulo de deformabilidade em função da tensão confinante para amostras 4 e 6 – Ultramilonito – Ensaio triaxial UU não saturado. ....	85
Figura 69 – Módulo de deformabilidade em função da tensão confinante para amostras 1 e 5 – Metabásica – Ensaio triaxial UU não saturado. ....	86
Figura 70 – Módulo de deformabilidade em função da tensão confinante para amostra 7 – Granito pouco milonitizado – Ensaio triaxial UU não saturado. ....	87
Figura 71 – $E_{50}/c$ em função de $\sigma_3$ para Filito – Ensaio triaxial UU não saturado. ....	88
Figura 72 – $E_{50}/c$ em função de $\sigma_3$ para Ultramilonito – Ensaio triaxial UU não saturado. ....	89
Figura 73 – $E_{50}/c$ em função de $\sigma_3$ para Granito pouco milonitizado – Ensaio triaxial UU não saturado. ....	89
Figura 74 – $E_{50}/c$ em função de $\sigma_3$ para Metabásica – Ensaio triaxial UU não saturado. ....	90
Figura 75 – Módulo de deformabilidade $E_{50}$ versus $\sigma_3$ – Amostra 2 – Filito – Ensaio triaxial CU saturado. ....	92
Figura 76 – Módulo de deformabilidade $E_{50}$ versus $\sigma_3$ – Amostra 3 – Filito – Ensaio triaxial CU saturado. ....	92
Figura 77 – Módulo de deformabilidade $E_{50}$ versus $\sigma_3$ – Amostra 6 – Ultramilonito – Ensaio triaxial CU saturado. ....	93

Figura 78 – Módulo de deformabilidade $E_{50}$ versus $\sigma_3$ – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado – Ensaio triaxial CU saturado. ....	93
Figura 79 – Módulo de deformabilidade em função da tensão confinante para amostras 2 e 3 – Filito – Ensaio triaxial CU saturado. ....	94
Figura 80 – Módulo de deformabilidade em função da tensão confinante para amostra 6 – Ultramilonito – Ensaio triaxial CU saturado. ....	95
Figura 81 – Módulo de deformabilidade em função da tensão confinante para amostra 7 – Granito pouco milonitizado – Ensaio triaxial CU saturado. ....	96
Figura 82 – Gráfico de trajetória de tensões e envoltória de Mohr Coulomb (ensaio triaxial UU não saturado) – Amostra 6 – $\Delta h = 4\%$ . ....	98
Figura 83 – Curva do parâmetro neutra $\bar{B}$ em função da tensão principal maior, $\sigma_1$ – Amostra 1 – Litologia: Filito. ....	99
Figura 84 – Curva do parâmetro neutra $\bar{B}$ em função da tensão principal maior, $\sigma_1$ – Amostra 2 – Litologia: Filito. ....	99
Figura 85 – Curva do parâmetro neutra $\bar{B}$ em função da tensão principal maior, $\sigma_1$ – Amostra 4 – Litologia: Ultramilonito. ....	100
Figura 86 – Curva do parâmetro neutra $\bar{B}$ em função da tensão principal maior, $\sigma_1$ – Amostra 5 – Litologia: Metabásica. ....	100
Figura 87 – Curva do parâmetro neutra $\bar{B}$ em função da tensão principal maior, $\sigma_1$ – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito. ....	101
Figura 88 – Curva do parâmetro neutra $\bar{B}$ em função da tensão principal maior, $\sigma_1$ – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado. ....	101
Figura 89 – Parâmetro de pressão neutra, $\bar{B}$ , em função do desvio de umidade em relação à ótima ( $\Delta h$ ) para $\sigma_1 = 1.000$ kPa. ....	103
Figura 90 – Carta de Plasticidade de Casagrande – Amostras ensaiadas e valores da bibliografia. ....	104
Figura 91 - Comparação entre parâmetro de pressão neutra, $\bar{B}$ , obtidos a partir de ensaios com os retirados do livro de Cruz (1996) para solos gnáissicos. ....	105
Figura 92 - Comparação entre parâmetro de pressão neutra, $\bar{B}$ , obtidos a partir de ensaios com a amostra 1 com os retirados de Cruz (1967) para solos de filito. ....	107
Figura 93 - Comparação entre parâmetro de pressão neutra, $\bar{B}$ , obtidos a partir de ensaios com a amostra 1 com os retirados de Cruz (1967) para solo de gnaiss. ....	108
Figura 94 - Comparação entre parâmetro de pressão neutra, $\bar{B}$ , obtidos a partir de ensaios com a amostra 2 com os retirados de Cruz (1967) para solos de filito. ....	109
Figura 95 - Comparação entre parâmetro de pressão neutra, $\bar{B}$ , obtidos a partir de ensaios com a amostra 2 com os retirados de Cruz (1967) para solo de gnaiss. ....	110
Figura 96 - Comparação entre parâmetro de pressão neutra, $\bar{B}$ , obtidos a partir de ensaios da amostra 4 com os retirados do livro de Cruz (1996). Nota: $1\text{kg/cm}^2 \approx 100$ kPa. ....	110
Figura 97 - Comparação entre parâmetro de pressão neutra, $\bar{B}$ , obtidos a partir de ensaios da amostra 5 com os retirados do livro de Cruz (1996). Nota: $1\text{kg/cm}^2 \approx 100$ kPa. ....	111

Figura 98 - Comparação entre parâmetro de pressão neutra, $\bar{B}$ , obtidos a partir de ensaios da amostra 6 com os retirados do livro de Cruz (1996). Nota: $1\text{kg/cm}^2 \approx 100\text{ kPa}$ .	111
Figura 99 - Comparação entre parâmetro de pressão neutra, $\bar{B}$ , obtidos a partir de ensaios da amostra 7 com os retirados do livro de Cruz (1996). Nota: $1\text{kg/cm}^2 \approx 100\text{ kPa}$ .	112
Figura 100 – Módulo de deformabilidade tangente inicial em função do desvio de umidade em relação à umidade ótima.	113
Figura 101 – Razão entre coesão efetiva, $c'$ , e a tensão de pré adensamento, $\sigma'_a$ , em função do índice de plasticidade, IP – Ensaio triaxial UU.	115
Figura 102 – Gráfico índice de compressão ( $C_c$ ) versus teor de umidade (h), em %.	115
Figura 103 – Gráfico índice de compressão ( $C_c$ ) versus índice de vazios inicial ( $e_0$ ).	116
Figura 104 – Índice de compressão, $C_c$ , versus teor de umidade, h, para todas as amostras, comparando com valores da bibliografia (Dib, 1985b).	117
Figura 105 – Índice de compressão, $C_c$ , versus índice de vazios, $e_0$ , para todas as amostras, comparando com valores da bibliografia (Dib, 1985b).	117
Figura 106 – Módulo de deformabilidade edométrico, M, em função da tensão vertical efetiva, $\sigma'_v$ – Amostra 2 – Litologia: Filito.	118
Figura 107 – Módulo de deformabilidade edométrico, M, em função da tensão vertical efetiva, $\sigma'_v$ – Amostra 4 – Litologia: Ultramilonito.	118
Figura 108 – Módulo de deformabilidade edométrico, M, em função da tensão vertical efetiva, $\sigma'_v$ – Amostra 5 – Litologia: Metabásica.	119
Figura 109 – Módulo de deformabilidade edométrico, M, em função da tensão vertical efetiva, $\sigma'_v$ – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito.	119
Figura 110 – Módulo de deformabilidade edométrico, M, em função da tensão vertical efetiva, $\sigma'_v$ – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonizado.	120
Figura 111 – Simbologia utilizada.	134
Figura 112 – Envoltória modificada de resistência – Solo saprolítico de Metassedimento – Tucuruí.	134
Figura 113 – Envoltória modificada de resistência – Solo saprolítico de Gnaiss – Chapéu D'uvas.	135
Figura 114 – Envoltória modificada de resistência – Solo saprolítico de Gnaiss – Euclídes da Cunha.	136
Figura 115 – Envoltória modificada de resistência – Solo saprolítico de Gnaiss – Chapéu D'uvas.	136
Figura 116 – Envoltória modificada de resistência – Solo saprolítico de Gnaiss – Chapéu D'uvas.	137
Figura 117 – Envoltória modificada de resistência – Solo saprolítico de Filito – Manso.	137
Figura 118 – Perfil de sondagem do local de extração a Amostra 1 – Filito/ Metabásica.	138
Figura 119 – Perfil de sondagem do local de extração a Amostra 3 – Filito.	139
Figura 120 – Perfil de sondagem do local de extração a Amostra 4 – Ultramilonito.	140
Figura 121 – Perfil de sondagem do local de extração a Amostra 5 – Metabásica.	141
Figura 122 – Perfil de sondagem do local de extração a Amostra 6 – Ultramilonito.	142
Figura 123 – Perfil de sondagem do local de extração a Amostra 7 – Granito pouco milonizado.	143
Figura 124 – Ensaio de compactação – Amostra 2 - Litologia: Filito.	144
Figura 125 – Ensaio de compactação – Amostra 3 - Litologia: Filito.	144

Figura 126 – Ensaio de compactação – Amostra 4 - Litologia: Ultramilonito. ....	145
Figura 127 – Ensaio de compactação – Amostra 5 - Litologia: Metabásica. ....	145
Figura 128 – Ensaio de compactação – Amostra 6 - Litologia: Ultramilonito. ....	146
Figura 129 – Ensaio de compactação – Amostra 7 - Litologia: Granito pouco milonitizado.....	146
Figura 130 – Amostra 1 – Filito/Metabásica - h <sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.....	147
Figura 131 – Amostra 1 - Filito/Metabásica - h <sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado. ....	147
Figura 132 – Amostra 1 - Filito/Metabásica - h <sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado. ....	148
Figura 133 – Amostra 1 - Filito/Metabásica - h <sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado. ....	148
Figura 134 – Amostra 1 – Filito/Metabásica - h <sub>ótima</sub> +2% – Ensaio UU não saturado. ....	149
Figura 135 – Amostra 1 - Filito/Metabásica - h <sub>ótima</sub> +2% – Ensaio UU não saturado.....	149
Figura 136 – Amostra 1 - Filito/Metabásica - h <sub>ótima</sub> +2% – Ensaio UU não saturado.....	150
Figura 137 – Amostra 1 - Filito/Metabásica - h <sub>ótima</sub> +2% – Ensaio UU não saturado.....	150
Figura 138 – Amostra 1 – Filito/Metabásica - h <sub>ótima</sub> +4% – Ensaio UU não saturado.....	151
Figura 139 – Amostra 1 - Filito/Metabásica - h <sub>ótima</sub> +4% – Ensaio UU não saturado.....	151
Figura 140 – Amostra 1 - Filito/Metabásica - h <sub>ótima</sub> +4% – Ensaio UU não saturado.....	152
Figura 141 – Amostra 1 - Filito/Metabásica - h <sub>ótima</sub> +4% – Ensaio UU não saturado.....	152
Figura 142 – Amostra 2 – Filito - h <sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.....	153
Figura 143 – Amostra 2 - Filito - h <sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.....	153
Figura 144 – Amostra 2 - Filito - h <sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.....	154
Figura 145 – Amostra 2 - Filito - h <sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.....	154
Figura 146 – Amostra 2 – Filito - h <sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado.....	155
Figura 147 – Amostra 2 - Filito - h <sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado.....	155
Figura 148 – Amostra 2 - Filito - h <sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado.....	156
Figura 149 – Amostra 2 - Filito - h <sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado.....	156
Figura 150 – Amostra 2 – Filito - h <sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio UU não saturado.....	157
Figura 151 – Amostra 2 - Filito - h <sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio UU não saturado. ....	157
Figura 152 – Amostra 2 - Filito - h <sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio UU não saturado. ....	158
Figura 153 – Amostra 2 - Filito - h <sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio UU não saturado. ....	158
Figura 154 – Amostra 3 – Filito - h <sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.....	159
Figura 155 – Amostra 3 - Filito - h <sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.....	159
Figura 156 – Amostra 3 - Filito - h <sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.....	160
Figura 157 – Amostra 3 - Filito - h <sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.....	160
Figura 158 – Amostra 3 – Filito - h <sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado.....	161
Figura 159 – Amostra 3 - Filito - h <sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado. ....	161
Figura 160 – Amostra 3 - Filito - h <sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado. ....	162
Figura 161 – Amostra 3 - Filito - h <sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado. ....	162
Figura 162 – Amostra 3 – Filito - h <sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio UU não saturado.....	163
Figura 163 – Amostra 3 - Filito - h <sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio UU não saturado. ....	163
Figura 164 – Amostra 3 - Filito - h <sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio UU não saturado. ....	164
Figura 165 – Amostra 3 - Filito - h <sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio UU não saturado. ....	164





Figura 206 – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado - $h_{ótima} + 2\%$ – Ensaio UU não saturado. ....	185
Figura 207 – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado - $h_{ótima} + 2\%$ – Ensaio UU não saturado.....	185
Figura 208 – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado - $h_{ótima} + 2\%$ – Ensaio UU não saturado.....	186
Figura 209 – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado - $h_{ótima} + 2\%$ – Ensaio UU não saturado.....	186
Figura 210 – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado - $h_{ótima} + 4\%$ – Ensaio UU não saturado. ....	187
Figura 211 – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado - $h_{ótima} + 4\%$ – Ensaio UU não saturado.....	187
Figura 212 – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado - $h_{ótima} + 4\%$ – Ensaio UU não saturado.....	188
Figura 213 – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado - $h_{ótima} + 4\%$ – Ensaio UU não saturado. ....	188
Figura 214 – Amostra 2 – Filito - $h_{ótima} + 2\%$ - Ensaio CU saturado. ....	189
Figura 215 – Amostra 2 - Filito - $h_{ótima} + 2\%$ - Ensaio CU saturado. ....	189
Figura 216 – Amostra 2 - Filito - $h_{ótima} + 2\%$ - Ensaio CU saturado. ....	190
Figura 217 – Amostra 2 - Filito - $h_{ótima} + 2\%$ - Ensaio CU saturado. ....	190
Figura 218 – Amostra 2 – Filito - $h_{ótima} + 4\%$ - Ensaio CU saturado. ....	191
Figura 219 – Amostra 2 - Filito - $h_{ótima} + 4\%$ - Ensaio CU saturado. ....	191
Figura 220 – Amostra 2 - Filito - $h_{ótima} + 4\%$ - Ensaio CU saturado. ....	192
Figura 221 – Amostra 2 - Filito - $h_{ótima} + 4\%$ - Ensaio CU saturado. ....	192
Figura 222 – Amostra 3 – Filito - $h_{ótima}$ - Ensaio CU saturado.....	193
Figura 223 – Amostra 3 - Filito - $h_{ótima}$ - Ensaio CU saturado. ....	193
Figura 224 – Amostra 3 - Filito - $h_{ótima}$ - Ensaio CU saturado. ....	194
Figura 225 – Amostra 3 - Filito - $h_{ótima}$ - Ensaio CU saturado. ....	194
Figura 226 – Amostra 3 – Filito - $h_{ótima} + 2\%$ - Ensaio CU saturado.....	195
Figura 227 – Amostra 3 - Filito - $h_{ótima} + 2\%$ - Ensaio CU saturado. ....	195
Figura 228 – Amostra 3 - Filito - $h_{ótima} + 2\%$ - Ensaio CU saturado. ....	196
Figura 229 – Amostra 3 - Filito - $h_{ótima} + 2\%$ - Ensaio CU saturado.....	196
Figura 230 – Amostra 3 – Filito - $h_{ótima} + 4\%$ - Ensaio CU saturado.....	197
Figura 231 – Amostra 3 - Filito - $h_{ótima} + 4\%$ - Ensaio CU saturado. ....	197
Figura 232 – Amostra 3 - Filito - $h_{ótima} + 4\%$ - Ensaio CU saturado. ....	198
Figura 233 – Amostra 3 - Filito - $h_{ótima} + 4\%$ - Ensaio CU saturado. ....	198
Figura 234 – Amostra 6 – Ultramilonito - $h_{ótima}$ - Ensaio CU saturado. ....	199
Figura 235 – Amostra 6 – Ultramilonito – $h_{ótima}$ - Ensaio CU saturado. ....	199
Figura 236 – Amostra 6 – Ultramilonito – $h_{ótima}$ - Ensaio CU saturado. ....	200
Figura 237 – Amostra 6 – Ultramilonito – $h_{ótima}$ - Ensaio CU saturado.....	200
Figura 238 – Amostra 6 – Ultramilonito - $h_{ótima} + 2\%$ - Ensaio CU saturado.....	201
Figura 239 – Amostra 6 – Ultramilonito – $h_{ótima} + 2\%$ - Ensaio CU saturado.....	201
Figura 240 – Amostra 6 – Ultramilonito – $h_{ótima} + 2\%$ - Ensaio CU saturado.....	202
Figura 241 – Amostra 6 – Ultramilonito – $h_{ótima} + 2\%$ - Ensaio CU saturado. ....	202
Figura 242 – Amostra 6 – Ultramilonito - $h_{ótima} + 4\%$ - Ensaio CU saturado.....	203
Figura 243 – Amostra 6 – Ultramilonito – $h_{ótima} + 4\%$ - Ensaio CU saturado.....	203
Figura 244 – Amostra 6 – Ultramilonito – $h_{ótima} + 4\%$ - Ensaio CU saturado.....	204
Figura 245 – Amostra 6 – Ultramilonito – $h_{ótima} + 4\%$ - Ensaio CU saturado. ....	204



Figura 286 – Amostra 4 – Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio triaxial PN. ....	227
Figura 287 – Amostra 4 – Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio triaxial PN. ....	227
Figura 288 – Amostra 5 - Litologia: Metabásica - h <sub>ótima</sub> . – Ensaio triaxial PN. ....	228
Figura 289 – Amostra 5 – Litologia: Metabásica - h <sub>ótima</sub> – Ensaio triaxial PN. ....	229
Figura 290 – Amostra 5 – Litologia: Metabásica - h <sub>ótima</sub> – Ensaio triaxial PN. ....	229
Figura 291 – Amostra 5 – Litologia: Metabásica - h <sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio triaxial PN. ....	230
Figura 292 – Amostra 5 – Litologia: Metabásica - h <sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio triaxial PN. ....	230
Figura 293 – Amostra 5 – Litologia: Metabásica - h <sub>ótima</sub> + 2%.– Ensaio triaxial PN. ....	231
Figura 294 – Amostra 5 – Litologia: Metabásica - h <sub>ótima</sub> + 4%– Ensaio triaxial PN. ....	231
Figura 295 – Amostra 5 – Litologia: Metabásica - h <sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio triaxial PN. ....	232
Figura 296 – Amostra 5 – Litologia: Metabásica - h <sub>ótima</sub> + 4%.– Ensaio triaxial PN. ....	232
Figura 297 – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> – Ensaio triaxial PN. ....	233
Figura 298 – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> – Ensaio triaxial PN. ....	234
Figura 299 – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> – Ensaio triaxial PN. ....	234
Figura 300 – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio triaxial PN. ....	235
Figura 301 – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio triaxial PN. ....	235
Figura 302 – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio triaxial PN. ....	236
Figura 303 – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> + 4%.– Ensaio triaxial PN. ....	236
Figura 304 – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> + 4%.– Ensaio triaxial PN. ....	237
Figura 305 – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> + 4%.– Ensaio triaxial PN. ....	237
Figura 306 – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> + 5% – Ensaio triaxial PN. ....	238
Figura 307 – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> + 5%.– Ensaio triaxial PN. ....	238
Figura 308 – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> + 5%.– Ensaio triaxial PN. ....	239
Figura 309 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - h <sub>ótima</sub> . – Ensaio triaxial PN. ....	240
Figura 310 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - h <sub>ótima</sub> – Ensaio triaxial PN. ....	241
Figura 311 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - h <sub>ótima</sub> – Ensaio triaxial PN. ....	241
Figura 312 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - h <sub>ótima</sub> + 2%.– Ensaio triaxial PN. ....	242
Figura 313 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - h <sub>ótima</sub> + 2%.– Ensaio triaxial PN. ....	242
Figura 314 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - h <sub>ótima</sub> + 2%.– Ensaio triaxial PN. ....	243
Figura 315 – Amostra 7 - Litologia: Granito pouco milonitizado - h <sub>ótima</sub> + 4%.– Ensaio triaxial PN. ....	243
Figura 316 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - h <sub>ótima</sub> + 4%.– Ensaio triaxial PN. ....	244
Figura 317 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - h <sub>ótima</sub> + 4%.– Ensaio triaxial PN. ....	244
Figura 318 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - h <sub>ótima</sub> + 5%.– Ensaio triaxial PN. ....	245
Figura 319 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - h <sub>ótima</sub> + 5%.– Ensaio triaxial PN. ....	245
Figura 320 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - h <sub>ótima</sub> + 5%.– Ensaio triaxial PN. ....	246
Figura 321 – Amostra 2 – h <sub>ótima</sub> - Litologia: Filito – Ensaio de adensamento edométrico. ....	247
Figura 322 – Amostra 2 – h <sub>ótima</sub> + 2% - Litologia: Filito – Ensaio de adensamento edométrico. ....	248
Figura 323 – Amostra 2 – h <sub>ótima</sub> + 4% - Litologia: Filito – Ensaio de adensamento edométrico. ....	249
Figura 324 – Amostra 4 – h <sub>ótima</sub> - Litologia: Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico. ....	251

Figura 325 – Amostra 4 – hótima + 2% - Litologia: Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico. .....	252
Figura 326 – Amostra 4 – hótima + 4% - Litologia: Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico. .....	253
Figura 327 – Amostra 5 – hótima - Litologia: Metabásica – Ensaio de adensamento edométrico.....	255
Figura 328 – Amostra 5– hótima + 2% - Litologia: Metabásica – Ensaio de adensamento edométrico. .....	256
Figura 329 – Amostra 5 – hótima + 4% - Litologia: Metabásica – Ensaio de adensamento edométrico. .....	257
Figura 330 – Amostra 6 – hótima - Litologia: Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico. ....	259
Figura 331 – Amostra 6 – hótima + 2% - Litologia: Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico. .....	260
Figura 332 – Amostra 6 – hótima + 4% - Litologia: Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico. .....	261
Figura 333 – Amostra 7 – hótima - Litologia: Granito pouco milonitizado – Ensaio de adensamento edométrico. ....	263
Figura 334 – Amostra 7 – hótima + 2% - Litologia: Granito pouco milonitizado – Ensaio de adensamento edométrico. ....	264
Figura 335 – Amostra 7 – hótima + 4% - Litologia: Granito pouco milonitizado – Ensaio de adensamento edométrico. ....	265
Figura 336 – Amostra 1 – hótima – Filito/ Metabásica – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão. ....	268
Figura 337 – Amostra 1 – hótima + 3% – Filito/ Metabásica – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão. ....	269
Figura 338 – Amostra 2 – hótima - Filito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão. ....	270
Figura 339 – Amostra 2 – hótima+3% - Filito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão. ....	271
Figura 340 – Amostra 2 – hótima-3% - Filito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão. ....	272
Figura 341 – Amostra 3 – hótima - Filito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão. ....	273
Figura 342 – Amostra 3 – hótima+3% - Filito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão. ....	274
Figura 343 – Amostra 3 – hótima-3% - Filito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão. ....	275
Figura 344 – Amostra 4 – hótima - Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão. ....	276
Figura 345 – Amostra 4 – hótima+3% - Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão. ....	277

Figura 346 – Amostra 4 – $h_{ótima}-3\%$ - Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão. ....	278
Figura 347 – Amostra 6 – $h_{ótima}$ - Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão. ....	279
Figura 348 – Amostra 6 – $h_{ótima}+3\%$ - Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão. ....	280
Figura 349 – Amostra 6 – $h_{ótima}-3\%$ - Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão. ....	281
Figura 350 – Amostra 7 – $h_{ótima}$ – Granito pouco milonitizado – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão. ....	282
Figura 351 – Amostra 7 – $h_{ótima}+3\%$ – Granito pouco milonitizado – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão. ....	283
Figura 352 – Amostra 7 – $h_{ótima}-3\%$ – Granito pouco milonitizado – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão. ....	284

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de ensaio de compactação - Energia de compactação por impacto. ....	15
Tabela 2 – Valores de diâmetro nominal e de superfície específica para diversos solos. ....	18
Tabela 3 – Solos residuais compactados. Legenda: Ver a lista de símbolos. ....	43
Tabela 4 – Valores médios da tensão de pré-adensamento, $\sigma'_a$ e do índice de compressão, $C_c$ . ....	51
Tabela 5 – Solos ensaiados. ....	63
Tabela 6 - Resultado dos ensaios de caracterização do solo. ....	66
Tabela 7 – Resultados do ensaio de compactação. ....	67
Tabela 8 – Parâmetros de resistência, efetivos e totais, obtidos nos ensaios triaxiais UU não saturado – GC = 95%. ....	69
Tabela 9 - Parâmetros de resistência, efetivos e totais, obtidos nos ensaios triaxiais CU saturado - GC = 95%. ....	69
Tabela 10 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos residuais compactados. ....	71
Tabela 11 – Valores de coesão efetiva calculados a partir de um valor fixo de ângulo de atrito efetivo, para ensaio UU não saturado. ....	74
Tabela 12 – Valores de coesão efetiva calculados a partir de um valor fixo de ângulo de atrito efetivo, para ensaio CU saturado. ....	74
Tabela 13 – Módulo de deformabilidade secante $E_{50} - h_{ótima}$ – Ensaios triaxiais UU não saturado. ....	79
Tabela 14 - Módulo de deformabilidade secante $E_{50} - h_{ótima} + 2\%$ – Ensaios triaxiais UU não saturado. .....	79
Tabela 15 - Módulo de deformabilidade secante $E_{50} - h_{ótima} + 4\%$ – Ensaios triaxiais UU não saturado. .....	79
Tabela 16 – Resumo dos coeficientes para ensaio triaxial UU não saturado. ....	87
Tabela 17 – Valores médios obtidos de $E_{50}/c$ para cada litologia – Ensaio triaxial UU não saturado. ....	90
Tabela 18– Módulo de deformabilidade secante $E_{50} - h_{ótima}$ – Ensaios triaxiais CU saturado. ....	91
Tabela 19– Módulo de deformabilidade secante $E_{50} - h_{ótima} + 2\%$ – Ensaios triaxiais CU saturado. ....	91
Tabela 20– Módulo de deformabilidade secante $E_{50} - h_{ótima} + 4\%$ – Ensaios triaxiais CU saturado. ....	91
Tabela 21 – Resumo dos coeficientes para ensaio triaxial CU saturado. ....	96
Tabela 22 - Tensões principais totais e efetivas e a pressão neutra na ruptura – Ensaio triaxial PN, com $\Delta h=4\%$ - Amostra 6. ....	97
Tabela 23 - Parâmetro de pressão neutra para $\sigma_1 = 1.000\text{kPa}$ . ....	102
Tabela 24 - Valores do módulo de deformabilidade tangente inicial. ....	113
Tabela 25 – Parâmetros obtidos a partir do ensaio de adensamento edométrico. ....	114
Tabela 26 – Valores máximos de M. ....	120
Tabela 27 - Resultados dos ensaios de adensamento edométricos – pressão de expansão e máxima variação volumétrica de cada amostra. ....	122
Tabela 28 - Amostra 1 – Filito/Metabásica - $h_{ótima}$ – Ensaio UU não saturado. ....	147
Tabela 29 – Amostra 1 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ – Ensaio UU não saturado. .....	148
Tabela 30 - Amostra 1 – Filito/Metabásica - $h_{ótima} + 2\%$ – Ensaio UU não saturado. ....	149

Tabela 31 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ - Ensaio UU não saturado.....	150
Tabela 32 - Amostra 1 – Filito/Metabásica - $h_{ótima}+4\%$ – Ensaio UU não saturado.....	151
Tabela 33 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ - – Ensaio UU não saturado.....	152
Tabela 34 - Amostra 2 – Filito - $h_{ótima}$ - Ensaio UU não saturado .....	153
Tabela 35 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ – Ensaio UU não saturado .....	154
Tabela 36 - Amostra 2 – Filito - $h_{ótima} +2\%$ – Ensaio UU não saturado.....	155
Tabela 37 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ – Ensaio UU não saturado.....	156
Tabela 38 - Amostra 2 – Filito - $h_{ótima} + 4\%$ – Ensaio UU não saturado.....	157
Tabela 39 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ - – Ensaio UU não saturado.....	158
Tabela 40 - Amostra 3 – Filito - $h_{ótima}$ – Ensaio UU não saturado.....	159
Tabela 41 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ – Ensaio UU não saturado.....	160
Tabela 42 - Amostra 3 – Filito - $h_{ótima} + 2\%$ – Ensaio UU não saturado.....	161
Tabela 43 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ – Ensaio UU não saturado.....	162
Tabela 44 - Amostra 3 – Filito - $h_{ótima} + 4\%$ – Ensaio UU não saturado.....	163
Tabela 45 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ – Ensaio UU não saturado.....	164
Tabela 46 - Amostra 4 – Ultramilonito - $h_{ótima}$ – Ensaio UU não saturado. ....	165
Tabela 47 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ – Ensaio UU não saturado.....	166
Tabela 48 - Amostra 4 – Ultramilonito - $h_{ótima} + 2\%$ – Ensaio UU não saturado.....	167
Tabela 49 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ . – Ensaio UU não saturado.....	168
Tabela 50 - Amostra 4 – Ultramilonito - $h_{ótima} + 4\%$ – Ensaio UU não saturado. ....	169
Tabela 51 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ – Ensaio UU não saturado.....	170
Tabela 52 - Amostra 5 – Metabásica - $h_{ótima}$ – Ensaio UU não saturado. ....	171
Tabela 53 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ – Ensaio UU não saturado.....	172
Tabela 54 - Amostra 5 – Metabásica - $h_{ótima}+2\%$ – Ensaio UU não saturado.....	173
Tabela 55 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ – Ensaio UU não saturado.....	174
Tabela 56 - Amostra 5 – Metabásica - $h_{ótima}+4\%$ – Ensaio UU não saturado.....	175
Tabela 57 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ – Ensaio UU não saturado.....	176
Tabela 58 - Amostra 6 – Ultramilonito - $h_{ótima}$ – Ensaio UU não saturado. ....	177
Tabela 59 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ – Ensaio UU não saturado.....	178
Tabela 60 - Amostra 6 – Ultramilonito - $h_{ótima} +2\%$ – Ensaio UU não saturado. ....	179
Tabela 61 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ – Ensaio UU não saturado.....	180
Tabela 62 - Amostra 6 – Ultramilonito - $h_{ótima} + 4\%$ – Ensaio UU não saturado. ....	181
Tabela 63 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ – Ensaio UU não saturado.....	182
Tabela 64 - Amostra 7 – Granito pouco milonitizado - $h_{ótima}$ – Ensaio UU não saturado.....	183
Tabela 65 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ – Ensaio UU não saturado.....	184
Tabela 66 - Amostra 7 – Granito pouco milonitizado - $h_{ótima}+2\%$ – Ensaio UU não saturado. ....	185
Tabela 67 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ – Ensaio UU não saturado.....	186
Tabela 68 - Amostra 7 – Granito pouco milonitizado - $h_{ótima}+4\%$ – Ensaio UU não saturado. ....	187
Tabela 69 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ – Ensaio UU não saturado.....	188
Tabela 70 - Amostra 2 – Filito - $h_{ótima}+2\%$ - Ensaio CU saturado. ....	189

Tabela 71 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ - Ensaio CU saturado. ....	190
Tabela 72 - Amostra 2 – Filito - $h_{ótima}+4\%$ - Ensaio CU saturado. ....	191
Tabela 73 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ - Ensaio CU saturado. ....	192
Tabela 74 - Amostra 3 – Filito - $h_{ótima}$ - Ensaio CU saturado.....	193
Tabela 75 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ - Ensaio CU saturado. ....	194
Tabela 76 - Amostra 3 – Filito - $h_{ótima}+2\%$ - Ensaio CU saturado. ....	195
Tabela 77 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ - Ensaio CU saturado. ....	196
Tabela 78 - Amostra 3 – Filito - $h_{ótima}+4\%$ - Ensaio CU saturado. ....	197
Tabela 79 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ - Ensaio CU saturado. ....	198
Tabela 80 - Amostra 6 – Ultramilonito – $h_{ótima}$ - Ensaio CU saturado. ....	199
Tabela 81 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ - Ensaio CU saturado. ....	200
Tabela 82 - Amostra 6 – Ultramilonito – $h_{ótima} + 2\%$ - Ensaio CU saturado.....	201
Tabela 83 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ - Ensaio CU saturado. ....	202
Tabela 84 - Amostra 6 – Ultramilonito – $h_{ótima} + 4\%$ - Ensaio CU saturado.....	203
Tabela 85 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ - Ensaio CU saturado. ....	204
Tabela 86 - Amostra 7 – Granito pouco milonitizado – $h_{ótima}$ - Ensaio CU saturado. ....	205
Tabela 87 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ - Ensaio CU saturado. ....	206
Tabela 88 - Amostra 7 – Granito pouco milonitizado – $h_{ótima}+2\%$ - Ensaio CU saturado. ....	207
Tabela 89 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ - Ensaio CU saturado. ....	208
Tabela 90 - Amostra 7 – Granito pouco milonitizado – $h_{ótima}+4\%$ - Ensaio CU saturado. ....	209
Tabela 91 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante $E_{50}$ - Ensaio CU saturado. ....	210
Tabela 92 – Corpos de prova – Amostra 1 – Ensaio triaxial PN.....	211
Tabela 93 – Corpos de prova – Amostra 2 – Filito – Ensaio triaxial PN. ....	216
Tabela 94 – Corpos de prova – Amostra 4 – Ultramilonito – Ensaio triaxial PN. ....	223
Tabela 95 – Corpos de prova – Amostra 5 – Metabásica – Ensaio triaxial PN. ....	228
Tabela 96 – Corpos de prova – Amostra 6 – Ultramilonito – Ensaio triaxial PN. ....	233
Tabela 97 – Corpos de prova – Amostra 7 - Granito pouco milonitizado – Ensaio triaxial PN. ....	240
Tabela 98 – Parâmetros obtidos a partir de ensaios de adensamento com a Amostra 2 (Filito), variando o desvio de umidade em relação à ótima – Ensaio de adensamento edométrico.....	250
Tabela 99 – Parâmetros obtidos a partir de ensaios de adensamento com a Amostra 4 (Ultramilonito), variando o desvio de umidade em relação à ótima – Ensaio de adensamento edométrico.....	254
Tabela 100 – Parâmetros obtidos a partir de ensaios de adensamento com a Amostra 5 (Metabásica), variando o desvio de umidade em relação à ótima – Ensaio de adensamento edométrico.....	258
Tabela 101 – Parâmetros obtidos a partir de ensaios de adensamento com a Amostra 6 (Ultramilonito), variando o desvio de umidade em relação à ótima – Ensaio de adensamento edométrico.....	262
Tabela 102 – Parâmetros obtidos a partir de ensaios de adensamento com a Amostra 7 (Granito pouco milonitizado), variando o desvio de umidade em relação à ótima – Ensaio de adensamento edométrico. ....	266
Tabela 103 – Resumo dos ensaios.....	267



## LISTA DE SÍMBOLOS

- $a_v$ : coeficiente de compressibilidade;
- $\bar{B}$ : parâmetro de pressão neutra;
- $C_c$ : índice de compressão;
- $C_r$ : índice de recompressão;
- $E$ : módulo de deformabilidade;
- $E_{50}$ : módulo de deformabilidade a 50% da tensão de ruptura;
- $E_i$ : módulo de deformabilidade tangente inicial;
- GC: Grau de compactação;
- H: altura de queda do soquete
- h: teor de umidade;
- $h_{ot}$ : umidade ótima do solo;
- IP: índice de plasticidade;
- LL: limite de liquidez;
- LP: limite de plasticidade.
- $M_s$ : massa do soquete
- M: módulo de deformabilidade edométrico
- $m_v$ : coeficiente de compressibilidade volumétrica;
- $N_c$ : número de camadas;
- $N_g$ : número de golpes por camada'
- S: grau de saturação
- $u_a$ : poro pressão no ar;
- $u_a$ : pressão no ar;
- $u_w$ : pressão na água;
- $u_w$ : pressão neutra do solo, ou poro pressão na água;
- V: volume do solo;

$\delta$ : peso específico dos grãos;

$\Delta h$ : desvio de umidade em relação a umidade ótima;

$\varepsilon_v$ : deformação específica vertical

$\gamma_0$ : peso específico da água;

$\gamma_s$ : peso específico seco;

$\gamma_{s,max}$ : peso específico seco máximo do solo;

$\nu$ : coeficiente de Poisson;

$\sigma$ : tensão total do solo;

$\sigma'$ : tensão efetiva do solo;

$\sigma'_v$ : tensão vertical efetiva em um ponto;

$\sigma'_c$ : desvio padrão da coesão efetiva;

$\sigma_1$ : tensão principal maior;

$\sigma_3$ : tensão principal menor, tensão de confinamento;

$\sigma_d$ : tensão desviadora.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
1.1	OBJETIVO .....	5
1.2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO DA PESQUISA.....	6
1.3	METODOLOGIA .....	7
1.4	ESTRUTURA DO TEXTO .....	7
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>9</b>
2.1	FORMAÇÃO DE SOLOS RESIDUAIS .....	9
2.2	COMPACTAÇÃO .....	12
2.2.1	<i>Definição .....</i>	<i>12</i>
2.2.2	<i>Ensaio Normal de Compactação ou Ensaio de Proctor Normal .....</i>	<i>12</i>
2.2.3	<i>Energia de compactação .....</i>	<i>15</i>
2.2.4	<i>Hipérbole de Kuczinski .....</i>	<i>17</i>
2.2.5	<i>Estrutura de solos compactados .....</i>	<i>18</i>
2.2.6	<i>Métodos ou tipos de compactação .....</i>	<i>21</i>
2.2.7	<i>Especificações de compactação .....</i>	<i>26</i>
2.3	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS COMPACTADOS .....	28
2.3.1	<i>Tensões no solo.....</i>	<i>28</i>
2.3.2	<i>Equações de resistência.....</i>	<i>32</i>
2.3.3	<i>Parâmetros de resistência de solos residuais compactados.....</i>	<i>37</i>
2.4	PARAMETRO DE PRESSÃO NEUTRA, $\bar{B}$ .....	44
2.5	COMPRESSIBILIDADE, DEFORMABILIDADE E EXPANSIBILIDADE .....	48
2.5.1	<i>Parâmetros de compressibilidade .....</i>	<i>48</i>
2.5.2	<i>Parâmetros de deformabilidade.....</i>	<i>51</i>
2.5.3	<i>Parâmetros de expansibilidade .....</i>	<i>53</i>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>55</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>63</b>
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	63
4.2	ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO.....	67
4.3	ENSAIOS TRIAXIAIS CU E UU.....	69

4.3.1	<i>Parâmetros de resistência</i> .....	69
4.3.2	<i>Módulo de deformabilidade</i> .....	78
4.4	ENSAIOS TRIAXIAIS PN .....	96
4.4.1	<i>Parâmetro de pressão neutra, <math>\bar{B}</math></i> .....	98
4.4.2	<i>Módulo de deformabilidade tangente inicial, <math>E_i</math></i> .....	112
4.5	ENSAIOS DE ADENSAMENTO EDMÉTRICO.....	114
4.5.1	<i>Pressão de pré-adensamento</i> .....	114
4.5.2	<i>Índice de compressão</i> .....	115
4.5.3	<i>Módulo de deformabilidade edométrico</i> .....	117
4.5.4	<i>Parâmetros de expansibilidade</i> .....	121
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>124</b>
5.1	CARACTERÍSTICAS DE IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	124
5.2	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	125
5.3	ENSAIOS TRIAXIAIS CU SATURADO E UU NÃO SATURADO .....	125
5.4	ENSAIOS TRIAXIAIS PN .....	127
5.5	ENSAIOS DE ADENSAMENTO .....	128
5.6	PROPOSTA PARA FUTURAS PESQUISAS .....	130
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>131</b>
	<b>ANEXO A</b> .....	<b>134</b>
	<b>APÊNDICE A – PROFUNDIDADE DE EXTRAÇÃO DAS AMOSTRAS</b> .....	<b>138</b>
	<b>APÊNDICE B – ENSAIO DE COMPACTAÇÃO</b> .....	<b>144</b>
	<b>APÊNDICE C – ENSAIOS TRIAXIAIS UU NÃO SATURADO</b> .....	<b>147</b>
	<b>APÊNDICE D – ENSAIOS TRIAXIAIS CU SATURADO</b> .....	<b>189</b>
	<b>APÊNDICE E – ENSAIOS TRIAXIAIS PN</b> .....	<b>211</b>
	<b>APÊNDICE F - ENSAIOS DE ADENSAMENTO EDMÉTRICO</b> .....	<b>247</b>
	<b>APÊNDICE G - ENSAIOS DE ADENSAMENTO EDMÉTRICO PARA OBTER PRESSÃO DE EXPANSÃO</b> .....	<b>267</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a partir do século XX, cada vez mais o transporte ferroviário foi sendo substituído pelo rodoviário. Por conta disso, a demanda por obras de infraestrutura rodoviária é cada vez maior para transporte de pessoas, mas principalmente para transporte de cargas, sendo que o modo rodoviário é responsável pela maior parte de cargas transportadas no país. Outro fator que indica a maior demanda por obras de infraestrutura é o crescimento da economia e da população. Para ilustrar, a Figura 1 mostra o mapa da malha rodoviária do Estado de São Paulo.

**Figura 1** – Mapa rodoviário do Estado de São Paulo.



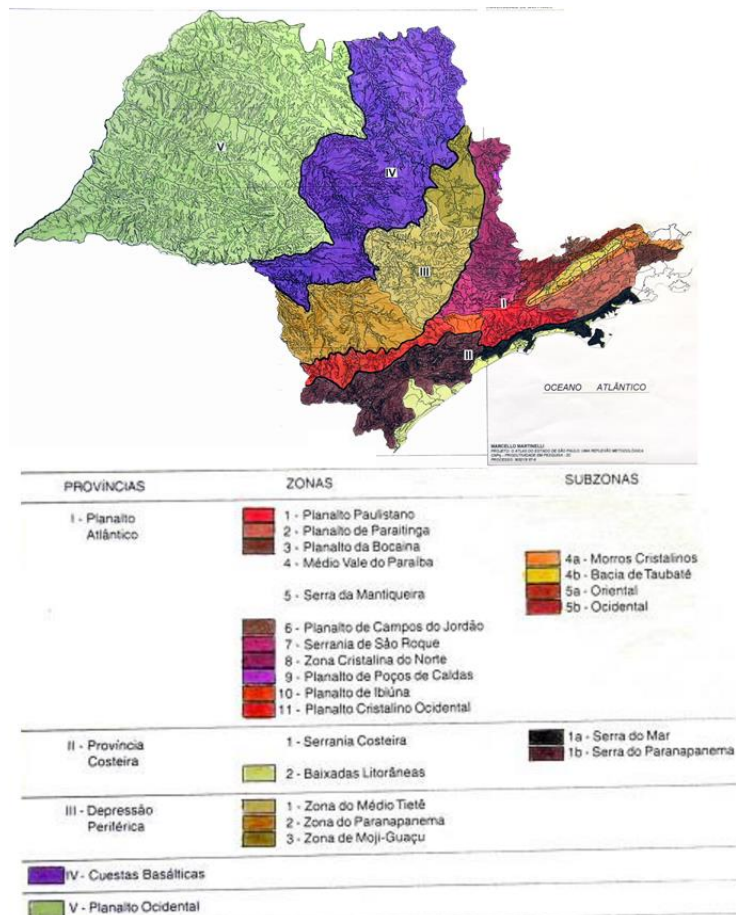
**Fonte:** SP Turismo.

Com isso, cada vez mais rodovias estão sendo construídas, em condições geológicas e geomorfológicas diversas. Em regiões de relevo ondulado a montanhoso, são necessários serviços de terraplenagem de corte e aterro, para atendimento do greide da pista projetada. Assim, existe uma crescente necessidade de investigações geológicas-geotécnicas, para prever o comportamento dos solos envolvidos nas obras de terraplenagem.

A Figura 2 mostra o mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. Segundo Mariana (2017), a geologia do Estado de São Paulo pode ser

compartimentada nas seguintes entidades geológicas: embasamento cristalino pré-cambriano, rochas sedimentares paleozoicas e mesozoicas da Bacia do Paraná, bacias sedimentares “terciárias” (Bacias de São Paulo e Taubaté), além de coberturas sedimentares quaternárias, associadas a ambientes fluviais, marinhos e mistos.

**Figura 2** – Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo.



**Fonte:** Confins apud Almeida (1964), adaptado pela autora.

O embasamento pré-cambriano é composto por complexos gnáissico-migmatíticos, seqüências supracrustais (Grupos São Roque e Itaberaba) e suítes graníticas intrusivas. Predominam na porção sudeste do Estado, sustentando as Províncias Geomorfológicas do Planalto Atlântico e as porções elevadas da Planície Costeira. Nas baixadas litorâneas predominam sedimentos quaternários como àqueles associados a Formação Pariquerá-Açu.

A seqüência sedimentar da Bacia do Paraná ocupa a região central do Estado, sustentando as formas de relevo associadas à Depressão Periférica e às Cuestas Basálticas. Por fim, a porção noroeste de São Paulo apresenta

domínio do Grupo Bauru, depositado sobre os derrames basálticos da Formação Serra Geral.

Distribuídas de forma irregular ao longo do Estado, em especial sobre rochas sedimentares da Bacia do Paraná, têm-se unidades cenozoicas como as Formações Rio Claro e Piraçununga, além de coberturas indiferenciadas. Na região metropolitana da cidade de São Paulo, afloram as unidades da Bacia de São Paulo, correlacionadas à Bacia de Taubaté, ambas pertencentes ao conjunto de bacias do Rift Continental do Sudeste do Brasil.

Para obras de terraplenagem, como aterros compactados, necessita-se conhecer a origem e as características do solo para que assim seja possível prever o comportamento da obra ao seu término e garantir segurança aos seus usuários ao longo do tempo.

Neste trabalho, foram estudados os solos, provenientes de decomposição de rochas, utilizados em aterros compactados dos lotes 14 e 15 do Trecho Norte do Rodoanel Mario Covas, localizado na divisa dos municípios de São Paulo e Guarulhos.

Os solos da região da obra possuem litologias diversas, entre as quais pode-se citar solos originários de filitos, granitos, ultramilonitos e metabásicas. Foram realizados ensaios, a fim de analisar o comportamento dos aterros compactados, no que diz respeito à resistência ao cisalhamento, adensamento, expansibilidade, parâmetros de deformabilidade, compressibilidade e geração de poro pressões.

Os parâmetros obtidos foram comparados com os de materiais de mesma litologia encontrados na literatura técnica.

## **1.1 OBJETIVO**

A pesquisa tem o objetivo de descrever e caracterizar o comportamento dos solos utilizados em aterros compactados, para as obras dos Lote 14 e 15, pertencentes ao Trecho Norte do Rodoanel Mário Covas de São Paulo.

A descrição e caracterização dos solos foram feitas a partir da interpretação dos seguintes ensaios:

- Ensaios de caracterização (Densidade dos grãos, Granulometria, Limites de Atterberg, Compactação na energia do Proctor Normal e teor de umidade natural);
- Ensaios triaxiais tipo rápido (UU) sem saturação e tipo adensado rápido (CU) saturado por contra-pressão;
- Ensaios triaxiais PN com medida de pressão neutra, com relação  $k=\sigma_1/\sigma_3 = 0,50$ ;
- Ensaios de adensamento edométrico.

## 1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO DA PESQUISA

A pesquisa concentra-se na obtenção de parâmetros geotécnicos do material utilizado para construção dos aterros compactados, constituído por solos residuais de litologias diversas ocorrentes na Região Metropolitana da Grande São Paulo. Foram determinados parâmetros de resistência, de deformabilidade, de compressibilidade, expansibilidade e o parâmetro de pressão neutra ( $\bar{B}$ ).

Os parâmetros de resistência, no caso o ângulo de atrito e a coesão do material, têm grande importância na avaliação da condição de estabilidade de cada aterro, tanto na fase de construção quanto de operação.

Os parâmetros de deformabilidade e compressibilidade são essenciais para a estimativa de recalques, principalmente na fase operacional da rodovia, quando as movimentações podem ocasionar danos ao pavimento e dispositivos de drenagem, como canaletas de concreto. Entre os parâmetros de deformabilidade que foram determinados estão o módulo de deformabilidade a 50% da tensão de ruptura ( $E_{50}$ ) e o módulo de deformabilidade tangente inicial ( $E_i$ ). Com relação aos parâmetros de compressibilidade, foram determinados o índice de compressão ( $C_c$ ), o índice de recompressão ( $C_r$ ), a tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_a$ ) e o módulo de deformabilidade edométrico ( $M$ ).

O parâmetro de pressão neutra,  $B'$ , representa a variação de pressão neutra ( $\Delta u$ ) quando se tem variação de tensões em condições não drenadas. Durante a construção de um aterro compactado, surgem incrementos positivos de poropressões, à medida que se vai alteando o maciço, uma vez que a velocidade de alteamento do aterro é superior à velocidade de drenagem da



água intersticial. Para avaliação das pressões neutras, foram utilizados resultados de análises de ensaios triaxiais do tipo PN com medida de pressão neutra, os quais consistem em solicitar um corpo de prova por acréscimos de tensões, confinante e axial, de tal forma que a relação entre elas é mantida constante. O objetivo deste ensaio é simular as tensões a que um aterro é submetido durante o seu alteamento.

Já o potencial de expansibilidade visa determinar o comportamento do solo com a presença de água, uma vez que, em um aterro compactado, pode gerar expansões ou retrações superficiais e trincas, podendo levar a estrutura do aterro à ruína.

Os resultados obtidos neste trabalho poderão ser utilizados como base para outros projetos e pesquisas com solos de mesma origem e litologia.

### **1.3 METODOLOGIA**

Foram realizados ensaios de laboratório com amostras compactadas de solos residuais da região metropolitana de São Paulo. Os ensaios realizados estão listados no item 3. As amostras ensaiadas possuíam grau de compactação igual a 95% e desvios de umidade em relação à umidade ótima variando entre 0% e 5%, exceto nos ensaios de adensamento para a medida da pressão de expansão, em que este desvio foi de -3%, 0% e +3%.

A partir destes ensaios, foram feitas análises para obtenção de parâmetros para solos residuais compactados. a análise foi separada por litologia, comparando, sempre que possível, os resultados com a literatura técnica com solos de origem semelhante.

### **1.4 ESTRUTURA DO TEXTO**

A presente dissertação está dividida em 5 capítulos.

O capítulo 1 é introdutório, com a apresentação dos objetivos, da metodologia, da justificativa e da relevância do tema.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dos aspectos teóricos para compreensão da formação de solos residuais e de solos compactados. Ademais, apresenta uma revisão sobre os parâmetros que são utilizados para descrever o comportamento dos solos residuais compactados: resistência ao

cisalhamento, parâmetro de pressão neutra ( $\bar{B}$ ), compressibilidade, deformabilidade e expansibilidade.

O capítulo 3 apresenta as amostras de solos residuais que foram estudadas, com descrição tátil visual e profundidade da qual foi retirada o bloco, além de citar suas litologias. Além disso, é apresentado o mapa da região da obra e um mapa geológico para descrição do local. Foram listados também os ensaios que foram analisados.

O capítulo 4 apresenta as análises dos resultados dos ensaios de caracterização, compactação, triaxiais CU saturado e UU não saturado, triaxiais PN e de adensamento edométrico. Sempre que possível, os resultados obtidos foram comparados com valores da bibliografia, para solos de origem semelhante.

O capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho e propostas para futuras pesquisas. Em seguida, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

O Anexo A apresenta envoltórias de resistência de Maiolino (1985) indicando os tipos de ensaios triaxiais que foram realizados para obter os parâmetros de resistência.

O Apêndice A apresenta os perfis de sondagem do local de extração de cada bloco. O Apêndice B apresenta o gráfico  $\gamma_s$  em função de h do ensaio de compactação para cada amostra. O Apêndice C apresenta os resultados e gráficos dos ensaios triaxiais UU não saturados e o Apêndice D apresenta dos ensaios triaxiais CU saturados. O Apêndice E apresenta os resultados e gráficos dos ensaios triaxiais PN. O Apêndice F apresenta os resultados e gráficos dos ensaios de adensamento edométrico. O Apêndice G apresenta os resultados e gráficos dos ensaios de adensamento edométrico para medição da pressão de expansão.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

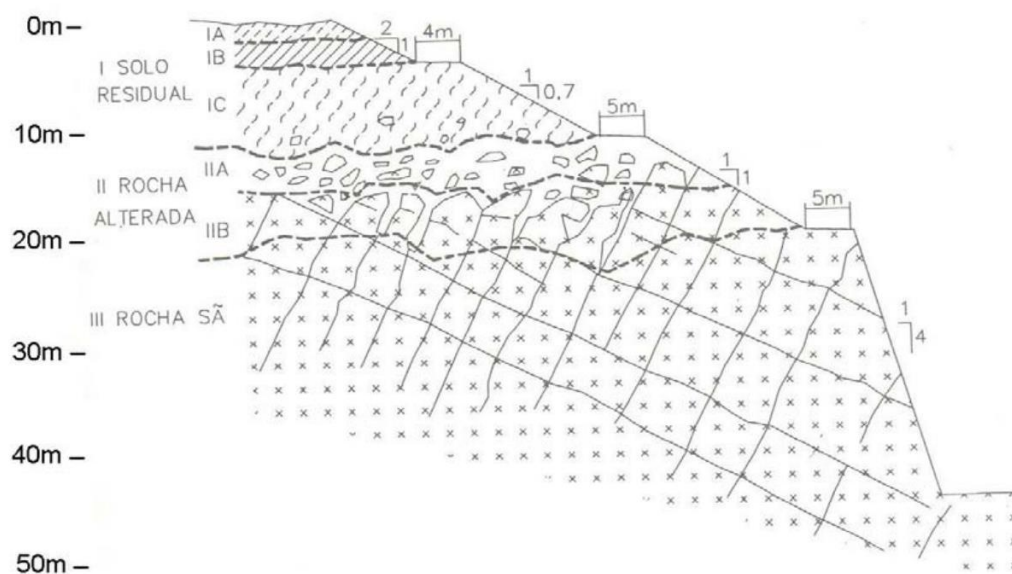
### 2.1 FORMAÇÃO DE SOLOS RESIDUAIS

Os solos residuais são provenientes da rocha sã intemperizada, através de um processo predominantemente químico, permanecendo in situ. O tipo de solo resultante depende de alguns fatores como: a rocha matriz, o clima, a topografia, a drenagem da área, processos orgânicos, entre outros.

Além disso, os solos residuais podem ou não manter peculiaridades estruturais das rochas que lhe deram origem. Quando existentes, estas peculiaridades, em grande parte das vezes, são o aspecto mais importante do maciço, regendo o comportamento estrutural perante uma obra de engenharia.

O perfil de intemperismo dos solos residuais pode variar de poucos até dezenas de metros. A Figura 3 ilustra o perfil de intemperização de solos residuais. O intemperismo pode agir nas camadas mais profundas através de juntas (fraturas) da rocha.

**Figura 3** – Perfil de intemperização.



**Fonte:** Deere e Patton (1971) adaptada por Vargas (1977).

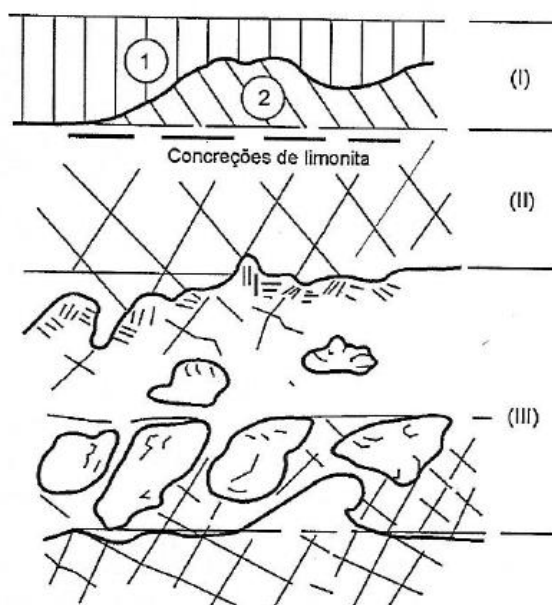
Em regiões do Pré-Cambriano, região da qual foram estudadas as amostras de solo deste trabalho, ocorrem solos residuais de micaxistos, granitos e gnaisses. Estes materiais podem gerar solos predominantemente siltsos e

micáceos. Já mais para o interior do Estado de São Paulo, há a predominância de solos residuais de basalto e arenito.

O professor Milton Vargas propôs em 1977 uma classificação dos solos de decomposição de rocha da região Centro-Sul do Brasil. Segundo ele, os solos residuais podem ser divididos em três horizontes: (I) solos residuais maduros; (II) solos residuais saprolíticos; (III) blocos de material alterado, conforme Figura 4.

Os solos residuais maduros (I), laterizados (1) ou não (2), são solos de decomposição de rocha que perderam toda a estrutura original da rocha matriz, assim, sendo mais homogêneos. Já os solos residuais saprolíticos (II) são solos que mantêm essas estruturas da rocha matriz, chamada também de anisotropia, que podem se apresentar através de xistossidades, juntas preenchidas, entre outros. Já blocos de materiais alterados (III) fazem parte do horizonte de rocha alterada no qual a ação do intemperismo progrediu ao longo das fraturas ou de zonas de menor resistência, deixando intactos estes blocos de rocha, envolvidos por solo.

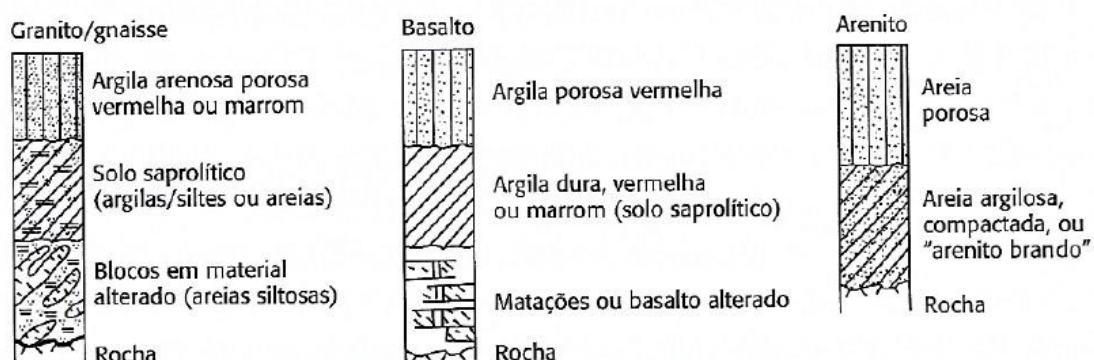
**Figura 4** – Solos de alteração de rocha da região Centro-Sul do Brasil.



**Fonte:** Vargas (1977).

Milton Vargas em seus estudos sobre solos da Região Centro-Sul do Brasil mostrou os perfis de intemperismo de rochas metamórficas, arenitos e basaltos, conforme Figura 5.

**Figura 5** – Perfis de intemperismo apresentados por Milton Vargas para solos residuais da Região Centro Sul do Brasil.



**Fonte:** Vargas (1977).

Com relação aos solos saprolíticos de regiões do Pré-Cambriano, como a região de estudo, durante escavações foram observadas a presença de juntas ou fraturas reliquiárias, por vezes estriadas (*slikensides*), conforme Figura 6, preenchidas com materiais de menor resistência, podendo constituir planos com potencial de escorregamento elevado. Estas juntas, por sua vez, são de difícil detecção em fases de investigação geológico-geotécnica.

**Figura 6** – Afloramento de Metabásica, com presença de óxido de manganês nas foliações, na Região Metropolitana de São Paulo.



**Fonte:** Arquivo pessoal.

Por fim, segundo Pinto (2006), ao estudar uma grande massa de solo residual, a probabilidade de encontrar porções semelhantes, a pequenas ou grandes distancias é praticamente igual. De acordo com o professor Milton

Vargas, os solos residuais são heterogeneamente homogêneos ou homogeneamente heterogêneos, associando a estes solos parâmetros médios de comportamento.

A importância do estudo de solos residuais se dá ao fato de que os resultados e análises obtidos podem ser utilizados como valores referenciais em outros projetos e pesquisas, em regiões próximas ou que venham a utilizar materiais de mesma origem e/ou litologia.

## **2.2 COMPACTAÇÃO**

### **2.2.1 Definição**

Entende-se por compactação de um solo a redução de seu índice de vazios, rapidamente, através, de processos mecânicos, graças à compressão do ar ou de sua expulsão dos vazios. Como parte do processo mecânico, pode-se incluir a aplicação de esforços de compressão estáticos, por impacto ou vibração. A estrutura formada varia de acordo com a energia de compactação, teor de umidade e tipo de solo.

O ensaio de Proctor, indispensável para o controle executivo de aterros compactados, surgiu na década de 1930, quando foram desenvolvidos estudos nos EUA para fins rodoviários para determinação da densidade seca máxima e a umidade ótima do solo.

### **2.2.2 Ensaio Normal de Compactação ou Ensaio de Proctor Normal**

A norma brasileira para o ensaio de compactação é a NBR 7182/1986.

Segundo essa norma, o ensaio inicia-se com o destorroamento da amostra, previamente seca ao ar. O ensaio pode ser feito de duas maneiras: pela via seca e pela via úmida. Pela via seca, seca-se a amostra até a umidade higroscópica. Em seguida, acrescenta-se água no solo, até que este fique com sua umidade 5% abaixo da umidade ótima. Pela via úmida, a amostra é seca o suficiente para obter o primeiro ponto da curva de Proctor. Pelo manuseio da amostra, é possível perceber se ele está acima ou não da umidade ótima. A umidade ótima é muito próxima ou um pouco abaixo do limite de plasticidade.

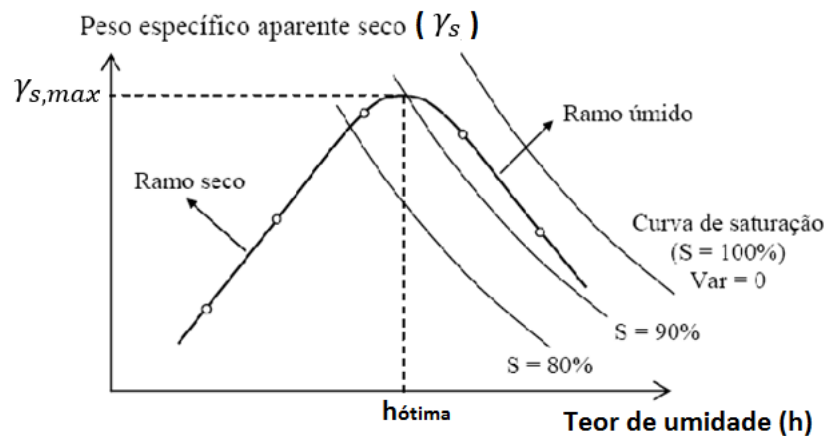
A amostra homogeneizada é colocada em um cilindro padrão, de 10 cm de diâmetro e volume de 1000 cm<sup>3</sup>, e submetida a 26 golpes com um soquete.

A porção do solo a ser compactado deve ser igual a um terço do cilindro. O processo é repetido duas vezes.

Determina-se a massa específica do corpo de prova obtido. Com uma amostra retirada de seu interior, determina-se a umidade. Obtidos estes valores, calcula-se seu peso específico seco.

O corpo de prova é destorroado e adiciona-se mais água, obtendo-se novamente a densidade seca e a umidade. Repete-se a operação até que 5 pontos sejam obtidos para definir a curva de compactação ou curva de Proctor. A partir dela, define-se a densidade seca máxima, à qual corresponde a uma umidade ótima. A Figura 7 ilustra uma curva de Proctor.

**Figura 7 – Curva de compactação.**



**Fonte:** Adaptado de Pinto (2006) pela autora.

A NBR permite o reuso do material para a obtenção dos diversos pontos da curva, gerando economia em termos de quantidade de solo para os ensaios. No entanto, o reuso do material pode provocar quebra de partículas. Em alguns casos, o reuso melhora a uniformização da umidade. Contudo, secar e umedecer o solo pode causar heterogeneidades, podendo, em alguns casos, alterar as características do solo.

A Figura 7 mostra também as curvas associadas a diversos graus de saturação, as quais podem ser determinadas através da Expressão (1).

$$\gamma_s = \frac{\delta}{1 + \frac{\delta * h}{\gamma_0 * S}} \quad (1)$$

Sendo:

S: grau de saturação

h: teor de umidade;

$\delta$ : peso específico dos grãos;

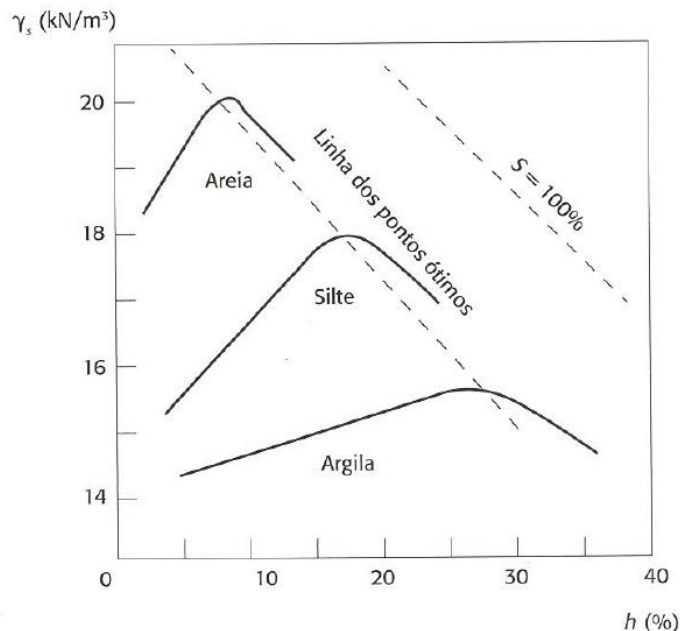
$\gamma_0$ : peso específico da água;

$\gamma_s$ : peso específico seco do solo.

Os pontos de umidade ótima e densidade seca máxima costumam situar-se entre 80 e 90% de grau de saturação.

Em geral, solos argilosos apresentam densidades secas máximas ( $\gamma_{s,max}$ ) baixas, entre 14 e 15 kN/m<sup>3</sup>, e umidades ótimas ( $h_{ótima}$ ) elevadas, entre 25% e 30%. Solos mais arenosos apresentam curvas menos abatidas, com  $\gamma_{s,max}$  maiores e  $h_{ótima}$  menores. Solos siltosos ocupam posição intermediária. A Figura 8 mostra a variação dos parâmetros de compactação para diversos tipos de solo compactados com a mesma energia.

**Figura 8** – Curvas de compactação para diversos tipos de solo e mesma energia.



**Fonte:** Yoder (1975) adaptada por Massad (2016).



### 2.2.3 Energia de compactação

A densidade seca máxima e a umidade ótima não são índices físicos dos solos, uma vez que dependem da energia aplicada, entre outros fatores. Portanto, sempre deve-se fazer referência ao tipo de ensaio realizado para obtenção dos parâmetros. O ensaio padronizado é o Ensaio de Proctor Normal. O Ensaio de Proctor Modificado é realizado em um cilindro grande, aplicando 55 golpes do soquete em cada uma de cinco camadas. Este ensaio é tomado como referência para a compactação de camadas mais importantes do pavimento, nas quais seja exigida uma melhoria das propriedades do solo, no ponto de vista do comportamento perante às solicitações do pavimento. A Tabela 1 mostra outros tipos de ensaio de compactação e suas características.

**Tabela 1** - Tipos de ensaio de compactação - Energia de compactação por impacto.

Designação	Peso (N)	Altura de queda (cm)	Número de camadas	Número de golpes	Volume do Cilindro (cm <sup>3</sup> )	Energia N cm/cm <sup>3</sup>
Proctor Normal	25	30,5	3	26	1000	57
Proctor Normal	45	45,0	5	12	2000	60
Intermediário	45	45,0	5	26	2000	130
Proctor Modificado	45	45,0	5	55	2000	270

**Fonte:** Massad (2016).

Na Tabela 1, a energia nominal de compactação foi calculada pela Expressão (2).

$$ENERGIA = \frac{M_s * H * N_g * N_c}{V} \quad (2)$$

Na qual:

M<sub>s</sub>: massa do soquete

H: altura do soquete

N<sub>g</sub>: número de golpes por camada

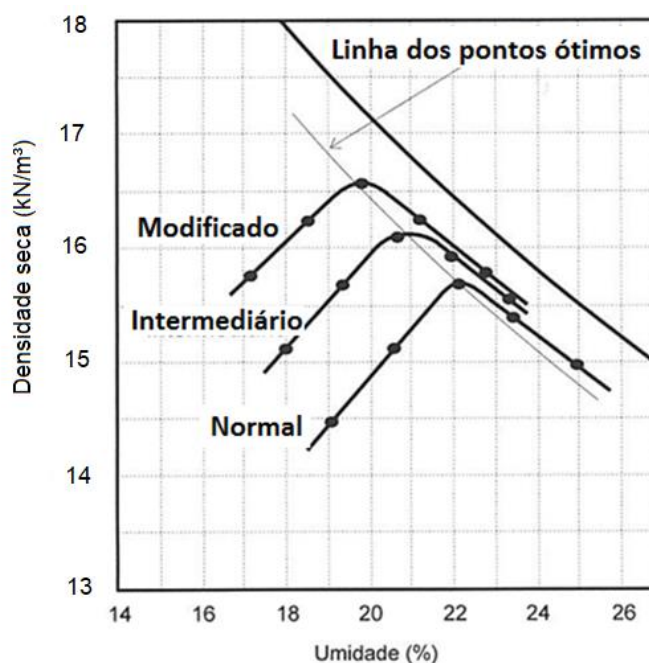
N<sub>c</sub>: número de camadas

V: volume do solo compactado

Quando o solo encontra-se com umidade abaixo da umidade ótima, o aumento da energia de compactação acaba resultando em uma maior densidade seca. Já quando a umidade é maior que a umidade ótima, tal esforço de compactação não é capaz de provocar um aumento significativo na densidade seca, uma vez que não é possível expelir o ar dos vazios. Assim, com o aumento da energia de compactação, a curva de compactação desloca-se para a esquerda, como mostra a Figura 9. A Figura 10 mostra a densidade seca máxima em função da energia de compactação. Vê-se que existe uma relação linear, como mostra a Expressão (3).

$$\gamma_{s,max} = a + b * \log(ENERGIA) \quad (3)$$

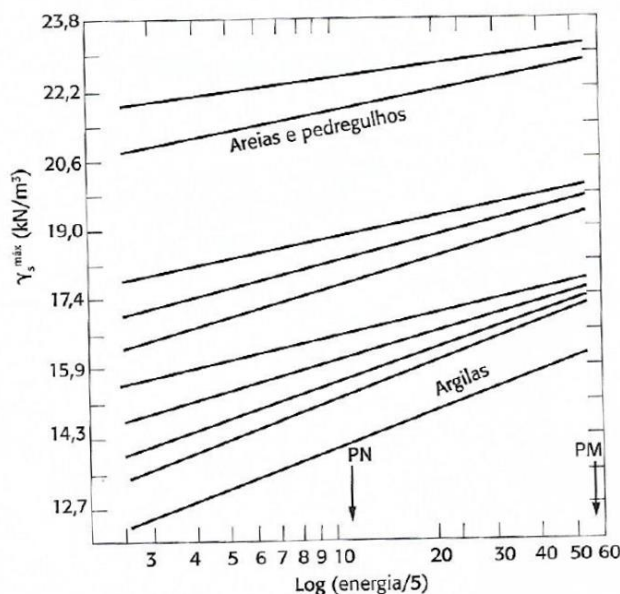
**Figura 9** – Curva de compactação de um solo com diferentes energias.



**Fonte:** Adaptado de Pinto (2006) pela autora.

A Expressão (3) é muito útil em laboratório para saber qual é a energia necessária a ser aplicada para obter determinadas características de corpo de prova. Sabe-se também que o parâmetro b é maior para solos mais argilosos, o que mostra que a densidade seca máxima em solos argilosos depende mais da energia de compactação.

**Figura 10** – Peso específico seco máximo para diversos tipos de solo, em função da energia de compactação.



**Fonte:** Adaptado de Yoder (1959) por Massad (2016).

A tentativa de compactação de um solo com umidade acima da ótima com maiores esforços de compactação pode torná-lo “borrachudo”, pois nessa condição o grau de saturação é elevado, as bolhas de ar ocluso se comprimem ou se dissolvem na água: a pressão aplicada é absorvida pela água, que devolve a compressão.

#### 2.2.4 Hipérbole de Kuczinski

Tanto na Figura 8, que mostra as curvas de compactação para diversos tipos de solo e mesma energia, quanto na Figura 9, com curvas de compactação de um mesmo solo com várias energias, nota-se que o lugar geométrico dos pontos ótimos é paralelo à linha hiperbólica com grau de saturação constante.

A sua equação, obtida por Kuczinski em 1950, pode ser escrita como:

$$\gamma_{s,\max} = \frac{25,37}{1 + 2,6 * h_{ot}} \pm 0,5 [kN/m^3] \quad (4)$$

Kuczinski utilizou mais de 1000 ensaios de compactação executados no IPT, em solos com características diferentes, provenientes de vários lugares do país.

### 2.2.5 Estrutura de solos compactados

A estrutura de solos argilosos é o resultado da interação elétrica entre as partículas de solo e a água dos poros que a envolve. Depende da composição mineralógica e das demais forças que podem atuar ao longo da história do solo.

A estrutura de solos granulares é composta basicamente de grãos de areia que se tocam. Esses grãos possuem forma arredondada ou angular, com superfície lisa ou rugosa. O principal mineral em sua constituição é o quartzo, o qual é considerado muito estável. Além disso, os solos granulares são denominados como “materiais inertes”, uma vez que as forças atuantes na estrutura são de origem gravitacional.

Já em solos com fração argilosa maior que 30%, o comportamento predominante é desta fração argilosa, a qual é denominada componente ativo do solo. Utiliza-se o termo “ativo” uma vez que estão presentes fenômenos físico-químicos nesta fração argilosa, enquanto na fração granular atuam apenas esforços físicos ou mecânicos, sendo denominada de “fração inerte”.

Os fenômenos físico-químicos e os esforços entre partículas devem-se a polaridade das partículas argilosas. O fenômeno da polaridade está relacionado com as elevadas superfícies específicas. A Tabela 2 mostra valores típicos de diâmetro nominal e de superfície específica para diversos materiais.

**Tabela 2** – Valores de diâmetro nominal e de superfície específica para diversos solos.

MATERIAL	DIÂMETRO NOMINAL $d_n$ (mm)	SUPERFÍCIE ESPECÍFICA $a_m$ ( $m^2/gr$ )	
Areia	$5 \times 10^{-1}$	$0,5 \times 10^{-2}$	
Silte	$5 \times 10^{-2}$	0,2	
Argila {	caolinita,	de $2 \times 10^{-3}$	10-20
	haloisita,	a	37-70
	ilita	$1 \times 10^{-4}$	65-100
	montmorilonita		50-800

**Fonte:** Maiolino (1985).

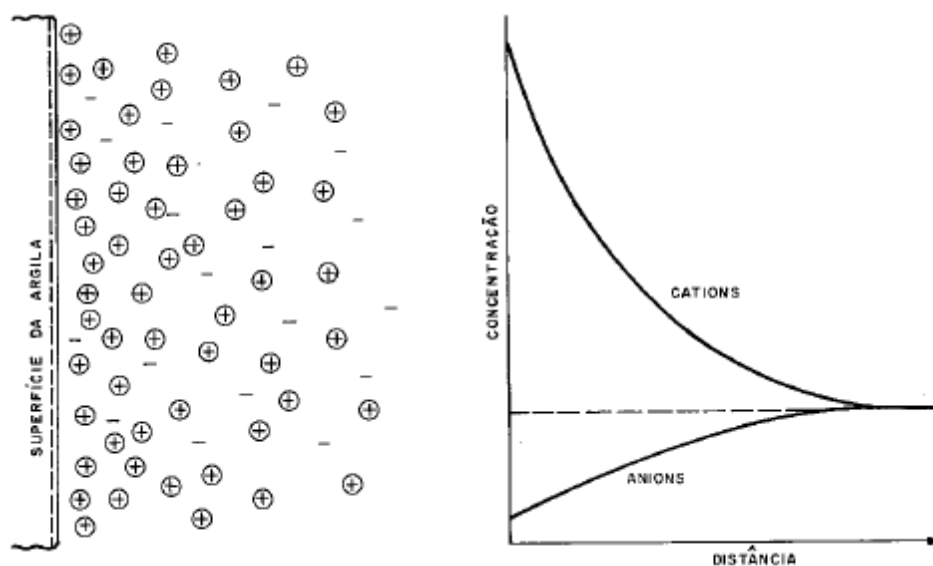
Sabe-se que as superfícies das partículas argilosas são sempre carregadas negativamente, enquanto suas arestas podem ter carga positiva ou negativa. Para manter a neutralidade elétrica, cátions do meio exterior são atraídos e mantidos seguros às suas superfícies. Estes cátions levam consigo moléculas de água. Além disso, existem também forças de atração entre as partículas de solo e de água, uma vez que a molécula de água é dipolar.

O conjunto de íons e moléculas de água atraídos pela partícula de argilo-minerais formam o que se chama de “camada dupla”. A Figura 11 mostra a camada dupla na superfície das partículas argilosas, a qual é carregada negativamente e é responsável pelas forças de repulsão nas partículas. Nota-se que a espessura da camada é definida pela distância na qual a energia potencial é nula.

A água adsorvida é formada pelas moléculas de água que estão mais próximas da superfície das partículas e estão fortemente atraídas por estas.

Já a água estrutural refere-se à água presa entre as folhas que constituem certos argilo-minerais (como a haloisita), a qual imprime aos solos uma densidade seca máxima baixa e umidade ótima elevada.

**Figura 11** – Distribuição de íons adjacentes à uma superfície de argila, conforme o conceito de camada de dupla difusão.

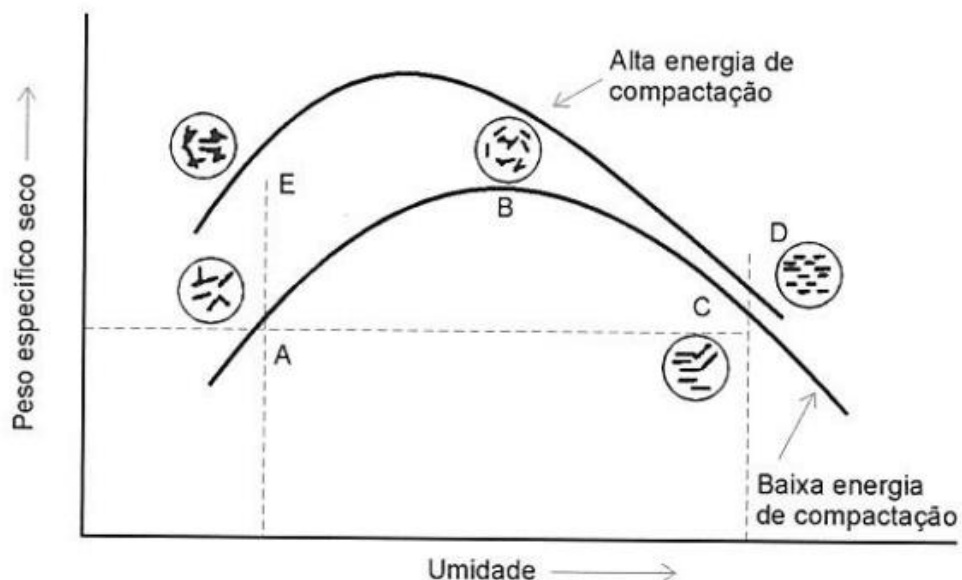


**Fonte:** Adaptado de Lambe & Whitman (1969) por Massad (2014).

De um ponto de vista macroscópico, a estrutura do solo compactado depende diretamente da energia aplicada, do tipo de compactação e da umidade do solo no momento de compactação.

Segundo Lambe (1951), para baixos teores de umidade, a concentração eletrolítica é alta, com predominância de forças atrativas de Van der Waals, o que é responsável pela estrutura floculada. Com o aumento da umidade, as forças atrativas diminuem, aumentando as forças repulsivas. Até atingir a umidade ótima, as partículas são rearranjadas, de forma a aumentar a densidade. A partir do momento que a densidade máxima é atingida, as forças repulsivas aumentam e superam as forças atrativas, formando uma estrutura com partículas dispersas, com menor densidade, já que a água reduz a quantidade de partículas por unidade de volume. A Figura 12 mostra a estrutura dos solos compactados na curva de compactação, isto é, variando umidade e peso específico máximo seco. A Figura 13 mostra dois tipos de estrutura idealizadas por Lambe (1969) para representar o comportamento de uma argila compactada.

**Figura 12** – Estruturas de solos compactados.

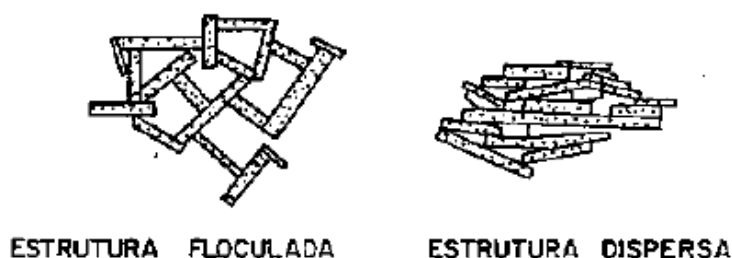


**Fonte:** Adaptado de Lambe (1951) por Massad (2014).

Hilf (1975), por sua vez, apresentou outra explicação para a estrutura do solo compactado. Sua explicação baseia-se na macroestrutura de solos não saturados, a qual utiliza o conceito de “grumos” ou agregações. Segundo ele, no

ramo seco, quando o teor de umidade e o grau de saturação são mais baixos, tensões capilares surgem no solo, propiciando a formação de grumos, que não se desfazem na compactação. Na medida em que a água é adicionada, as tensões capilares sofrem uma redução e, conseqüentemente, amolecem os grumos, que se desmancham, levando o solo a ter uma estrutura dispersa após a compactação.

**Figura 13** – Modelo de Lambe para esqueleto sólido de uma argila.



**Fonte:** Adaptado de Lambe & Whitman (1969) por Maiolino (1985).

### 2.2.6 Métodos ou tipos de compactação

Existem diversos métodos de compactação, que divergem entre si pela maneira como se aplica a energia. Além disso, os moldes cilíndricos utilizados em cada método também podem variar, a fim de reproduzir os resultados de campo em laboratório para previsão do comportamento do solo. São quatro tipos principais de compactação:

- Compactação por vibração;
- Compactação por impacto;
- Compactação por pisoteamento;
- Compactação estática.

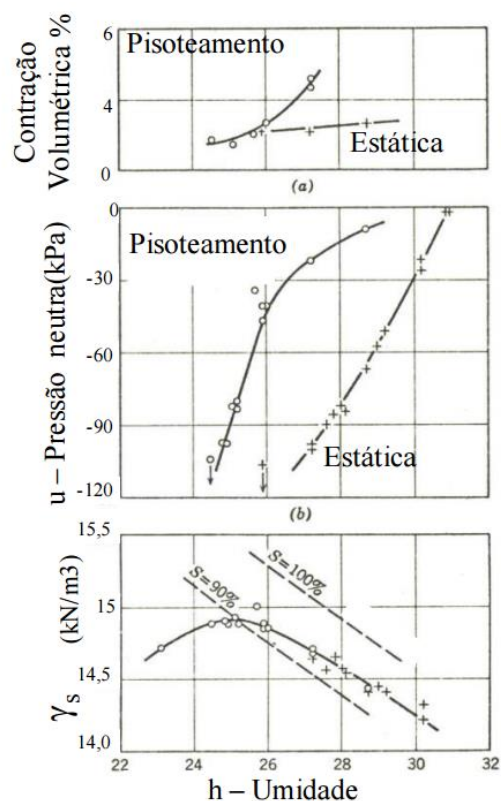
Apesar de existirem estes quatro tipos de compactação, todos conduzem para o mesmo comportamento no ramo seco, de estrutura floculada. Já no ramo úmido, o comportamento da estrutura depende de quão intensa é a aplicação de distorções (deformações cisalhantes): quanto mais intensa, maior é a orientação entre as partículas. Assim, na compactação por pisoteamento, a estrutura será mais dispersa do que estrutura de um ensaio de compactação por impacto. Além disso, quanto maior o teor de umidade no ramo úmido, maior é a pressão neutra

durante a compactação e menor a resistência do solo, o que gera estruturas mais dispersas na compactação por impacto ou pisoteamento. A Figura 14 mostra como variam as pressões neutras, contrações volumétricas e peso específico máximo da Caolita compactada por pisoteamento e pelo método de compactação estática.

Assim, algumas propriedades de engenharia podem ser explicadas:

- Um solo com teor de umidade no ramo seco e, portanto, estrutura floculada, oferece maior resistência do que um solo com estrutura dispersa. Para uma mesma energia de compactação, aumentando a umidade de moldagem, a permeabilidade diminui. No ramo úmido, ocorre um pequeno aumento da permeabilidade. A Figura 15 mostra este fato.
- Para uma mesma densidade seca e mesma energia de compactação, solos compactados no ramo seco são menos compressíveis que os solos compactados no ramo úmido. A Figura 16 mostra este fato.

**Figura 14** – Pressões neutras e contrações volumétricas em solo compactado de Caolinita.



**Fonte:** Adaptado de Lambe & Whitman (1969) por Massad (2016).



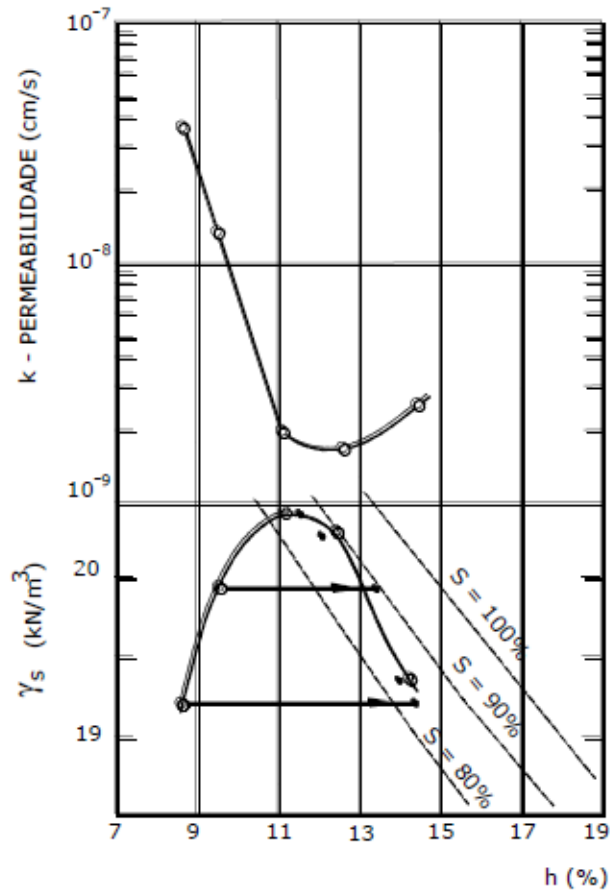
- Solos no ramo úmido, portanto com estrutura dispersa, desenvolvem maiores pressões neutras para pequenas deformações quando solicitados por tensões cisalhantes. Como consequência, observa-se que a curva de tensão-deformação é mais abatida. No entanto, para deformações maiores, as pressões neutras caem e se mantém no mesmo nível das pressões desenvolvidas quando o solo está com estrutura flokulada, portanto, no ramo seco da curva de compactação. As Figura 17 e Figura 18 mostram as curvas de resistência e deformação para o mesmo solo compactado em diferentes umidades.

Assim, a resistência ao cisalhamento do solo é independente do tipo de compactação, quando comparados corpos de prova saturados e moldados com mesmo teor de umidade ( $h$ ), mesma tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ) e mesmo peso específico seco ( $\gamma_s$ ). Para grandes deformações, as partículas de solo se alinham. A Figura 19 ilustra tal fato. As curvas foram obtidas a partir da compactação de quatro amostras do mesmo solo, uma argila siltosa, as quais foram compactadas por pisoteamento e estaticamente, para ficarem na mesma umidade e densidade seca de moldagem. Um par de amostras foi compactado abaixo da umidade ótima, portanto no ramo seco da curva de compactação, enquanto o outro par foi compactado com um teor de umidade acima da umidade ótima. Os corpos foram saturados e submetidos a ensaios triaxiais rápidos não drenados. O resultado obtido foi uma estrutura com partículas dispersas para o corpo de prova compactado por pisoteamento com teor de umidade acima da ótima, enquanto para os demais ensaios a estrutura das partículas é flokulada.

- Para grandes deformações, as resistências a ruptura são iguais, ou seja, possuem o mesmo círculo no diagrama de Mohr. Assim, os parâmetros de resistência independem do tipo de compactação.

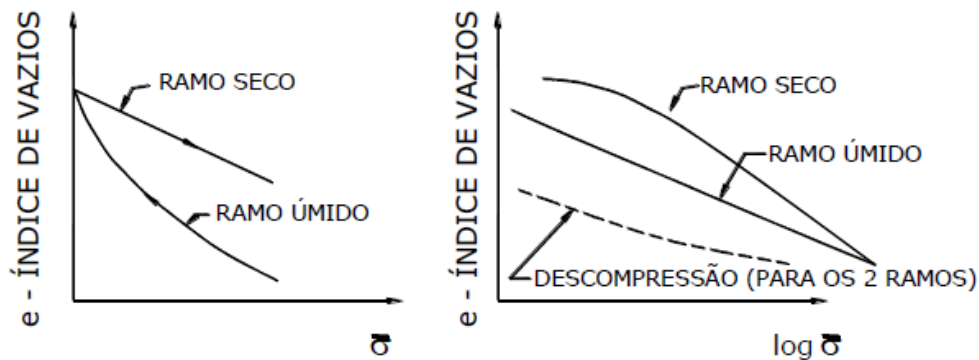
Por fim, na compactação por pisoteamento acima da umidade ótima, a estrutura das partículas, apesar de ser dispersa, pode possuir comportamento de estrutura flokulada, devido à presença de fração de areia.

**Figura 15** - Permeabilidade em solos compactados.



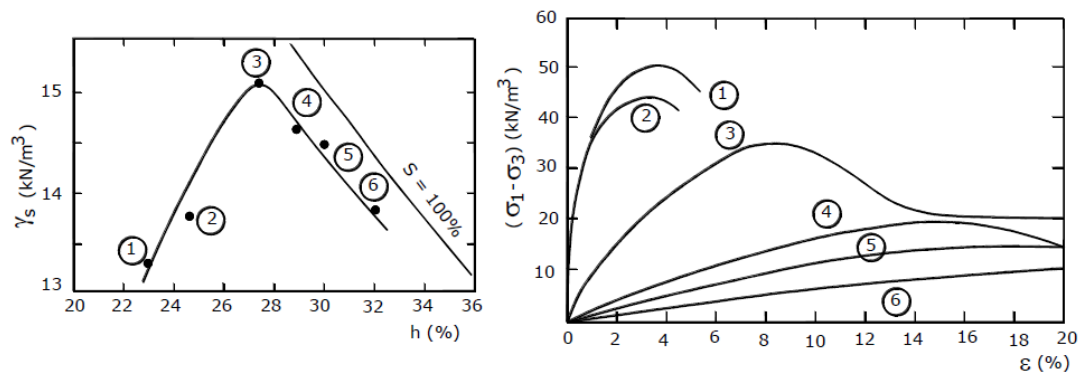
**Fonte:** Adaptado de Lambe & Whitman, Soil Mechanics (1969) por Massad (2016).

**Figura 16** – Compressibilidade de solos compactados.



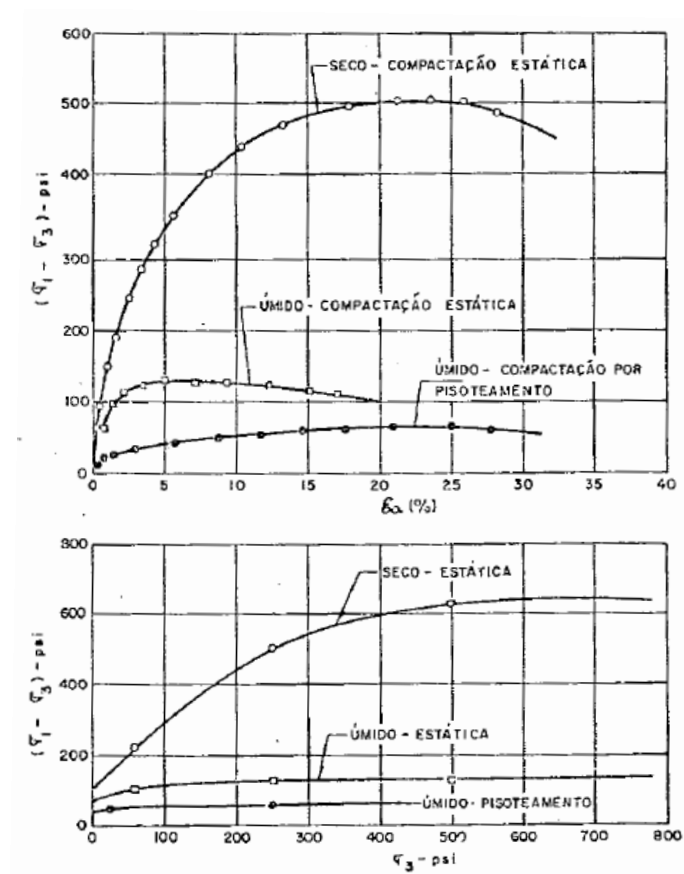
**Fonte:** Adaptado de Lambe (1951) por Massad (2016).

**Figura 17** - Influência da Estrutura de Solos Compactados nas Relações Tensão-Deformação.



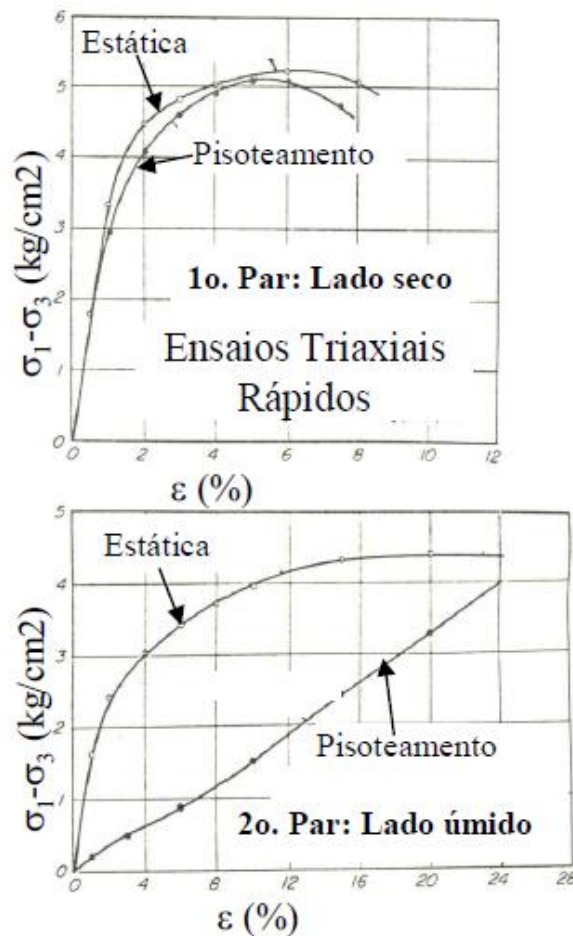
**Fonte:** Adaptado de Seed & Chan (1959) por Massad (2016).

**Figura 18** – Ensaio triaxiais do tipo UU em amostras compactadas da Higgins clay. Nota 1 psi  $\approx$  6,89 kPa



**Fonte:** Apud Maiolino (1985).

**Figura 19** – Curvas de Tensão versus deformação para argilas siltosas em duas condições de compactação (estática e pisoteamento). Nota  $1 \text{ kg/cm}^2 \approx 100 \text{ kPa}$ .



**Fonte:** Adaptado de Seed & Chan (1959) por Massad (2016).

### 2.2.7 Especificações de compactação

Para cada tipo de obra, condições de compactação específicas são exigidas. As propriedades dos solos compactados dependem da umidade e da energia que determinam o grau de compactação e o desvio de umidade em relação à ótima, com reflexos na estrutura do solo, como se viu acima.

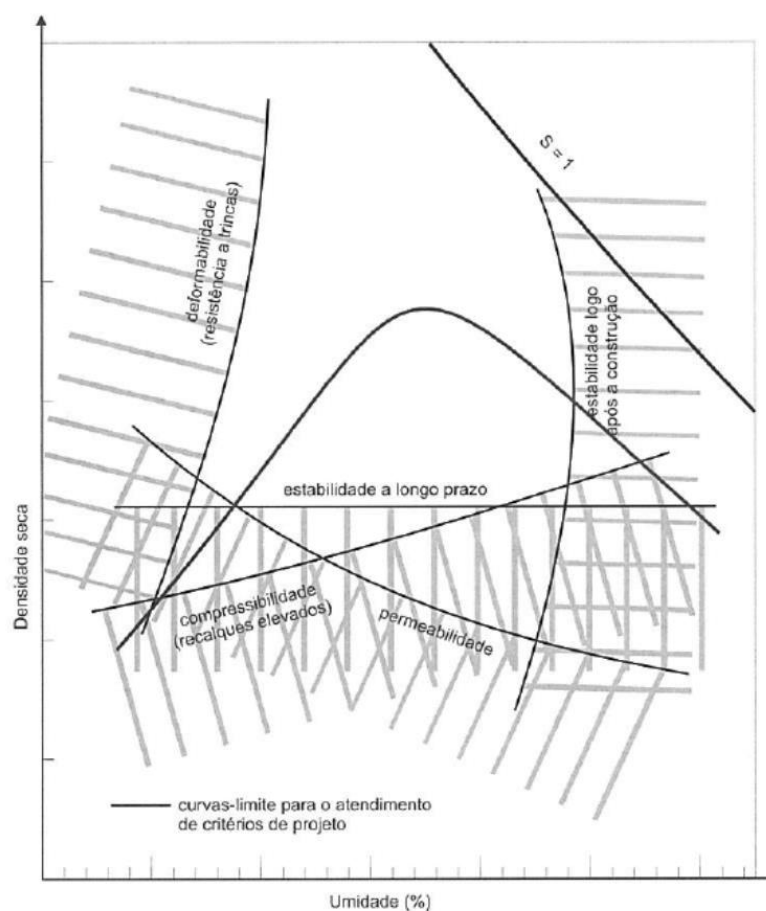
No caso de taludes em rodovias, tem-se grande preocupação com sua estabilidade após a construção. Assim, deve-se dar maior atenção a fatores como a umidade de compactação e a permeabilidade, que influem nas pressões neutras. Já para a estabilidade ao longo prazo, deve-se ter maior atenção aos parâmetros efetivos de resistência obtidos através do ensaio triaxial lento (CD).

A experiência mostra que estes fatores dependem do grau de compactação e do desvio de umidade.

Caso tais aterros tenham restrições quanto à deformabilidade, deve-se analisar caso a caso, levando em consideração os parâmetros de deformabilidade e compressibilidade do material do próprio aterro, além da compressibilidade do material da fundação.

Pinto (2006) definiu alguns limites de aceitabilidade no diagrama de Proctor, sob cada um dos aspectos a se considerar em um aterro. As linhas-limite da Figura 20 definem uma zona dentro da qual o solo compactado atenderia às condições definidas em projeto, sendo a zona de especificação da compactação do aterro.

**Figura 20** – Definição das especificações de compactação de um aterro de acordo com o comportamento do solo.



**Fonte:** Pinto (2006).

Alguns órgãos rodoviários apresentam especificação de compactação para os aterros, como, por exemplo, o DER (Departamento de Estradas de Rodagem) de São Paulo e o DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte).

Segundo o DNIT e o DER-SP, para um aterro rodoviário, os seguintes limites devem ser respeitados:

- Ser isentos de matéria orgânica;
- CBR  $\geq 2\%$  e expansão  $< 4\%$ , ou o especificado em projeto;
- GC  $\geq 95\%$ ;
- $\Delta h$ :  $\pm 3\%$ .

## 2.3 RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO DE SOLOS COMPACTADOS

### 2.3.1 Tensões no solo

No solo, existem tensões devido ao peso próprio do solo e às cargas aplicadas. Pode-se calcular a tensão total do solo, devido ao peso próprio, como sendo o produto entre o peso específico do solo e a profundidade na qual deseja-se obter a tensão total, segundo a Expressão (5).

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \gamma_i * z_i \quad (5)$$

Considerando o nível d'água do solo, pode-se calcular a pressão neutra a que o solo estará sujeito, a qual é independente da porosidade do solo e depende só da profundidade em relação ao nível freático, segundo a Expressão (6).

$$u = (z_A - z_W) * \gamma_w \quad (6)$$

Sendo:

$z_A$ : profundidade na qual deseja-se calcular a pressão neutra;

$z_W$ : profundidade da linha freática.

A Expressão (6) é válida apenas para os casos em que a profundidade  $z_A$  é maior que a profundidade da linha freática,  $z_W$ .

Já a tensão efetiva pode ser calculada como a diferença entre a tensão total e a pressão neutra, para solos saturados, a qual é a tensão transmitida pelos contatos entre partículas. A Expressão (7) mostra o cálculo da tensão efetiva para solos saturados, segundo Terzaghi.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (7)$$

No caso de solos não saturados, a existência de um sistema trifásico, composto de solo, ar e água, faz com que outros fatores sejam levados em consideração, como a interação entre água e ar, solubilidade do ar e compressibilidade do esqueleto sólido.

A Figura 21 mostra duas partículas de um material e suas correspondentes áreas.

A tensão total pode ser calculada segundo a Expressão (8):

$$\sigma = \sigma' + u_a * \frac{a_a}{A} + u_w * \frac{a_w}{A} + \sigma_c * \frac{a_c}{A} \quad (8)$$

Sendo:

$u_a$ : pressão no ar;

$u_w$ : pressão na água;

$a_a$ : área ocupada pelo ar;

$a_w$ : área ocupada pela água;

$a_c$ : área de contato;

$A$ : área total.

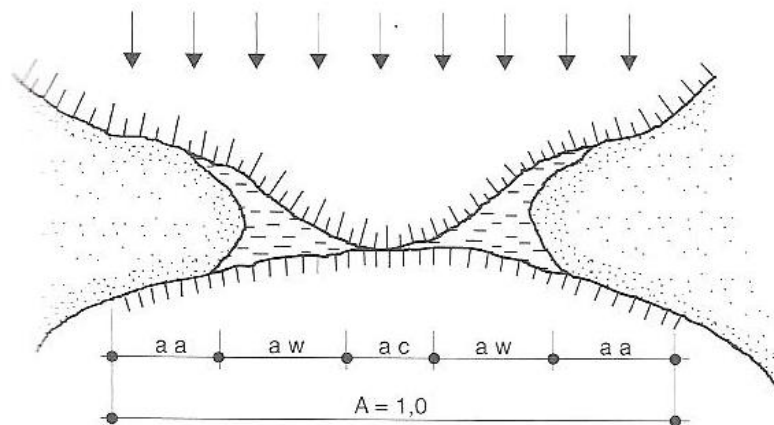
$\sigma_c$ : tensão de contato, calculada pela Expressão (9).

$$p_c = \sigma_c * \frac{a_c}{A} \rightarrow \sigma_c = \frac{A}{a_c} * p_c \quad (9)$$

Sendo:

$p_c$ : pressão de contato.

**Figura 21** – Áreas no contato de duas partículas.



**Fonte:** Cruz (1996).

Bishop apud Cruz (1996) propôs uma expressão mais simplificada para o cálculo da tensão efetiva em solos não saturados, conforme a expressão (10).

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi^*(u_a - u_w) \quad (10)$$

Onde  $\chi$  um parâmetro que depende do grau de saturação do solo.

Para solos secos, o parâmetro  $\chi$  é igual a zero, enquanto para solos saturados é igual a 1. Além de ser influenciado pelo grau de saturação do material, este parâmetro também sofre influências do ciclo de molhagem ou secagem do material, estrutura do solo e mudanças em seu estado de tensões.

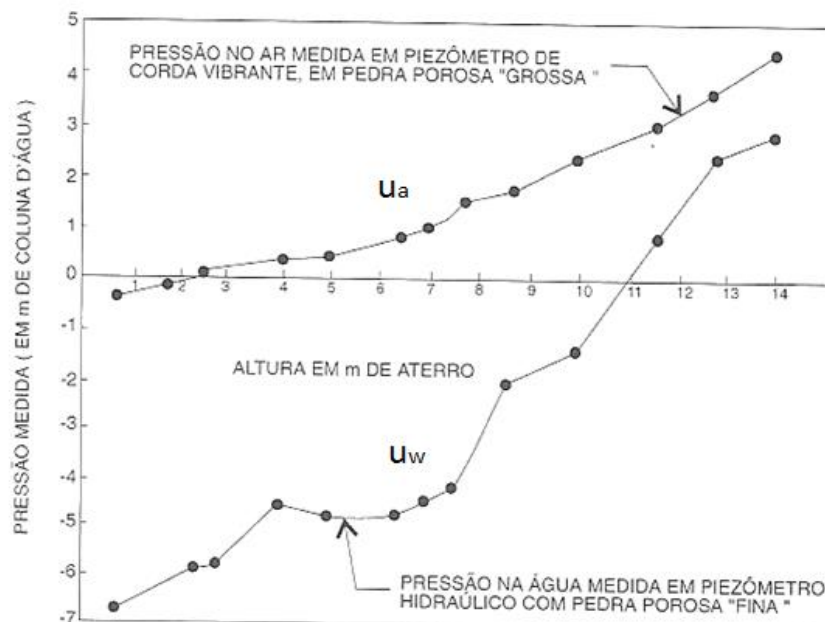
Essa questão da interveniência da sucção foi abordada com mais profundidade por Fredlung. No entanto, como os ensaios triaxiais analisados nessa pesquisa foram realizados sem medidas de sucção, não será considerada tal abordagem.

Segundo Cruz (1993), em aterros de grandes alturas, as pressões atuantes em camadas mais inferiores tendem a comprimir o solo, que, aos poucos, torna-se mais saturado. Nesta fase, uma parte do ar é expulsa pelos canais que ainda se comunicam e a outra parte se dissolve na água, reduzindo a diferença entre  $(u_a - u_w)$ . Assim, observa-se maior pressão do ar quanto mais alto é o aterro, como mostra a Figura 22. Observa-se ainda que quando o aterro ainda não começou a ser construído, a pressão da água é negativa, assumindo



o maior valor em módulo. Assim, com a construção do aterro, a diferença entre  $(u_a - u_w)$  vai diminuindo, como dito no parágrafo anterior.

**Figura 22** – Medidas de pressão nos poros de uma barragem em Chalmers, durante o lançamento de 14 m de aterro.



**Fonte:** Cruz (1996).

Para fins práticos, considera-se o caso particular de solos não saturados com ar ocluso. Neste caso, a pressão do ar continua sendo diferente da pressão da água, uma vez que o volume de água nos vazios é suficiente para isolar o ar nos vazios maiores em forma de bolha. A pressão que passa a atuar nas partículas é a pressão da água. Além disso, por se tratar de solos não saturados, a área de atuação da água num plano não será integral, portanto a parcela  $a_w/A$  ainda será menor do que 1.

Da expressão (8), admitindo-se que a área de contato ( $a_c$ ) seja desprezível, tem-se:

$$\sigma = \sigma' + u_a * \frac{a_a}{A} + u_w * \frac{a_w}{A} \quad (11)$$

Ademais, como:

$$A = a_w + a_a \rightarrow a_w = A - a_a \quad (12)$$

A expressão (11) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\sigma' = (\sigma - u_w) - \frac{\alpha_a}{A} * (u_a - u_w) \quad (13)$$

Em suma, conforme as conclusões de Cruz (1996), pode-se dizer que:

- A equação de Terzaghi - Expressão (7) - é uma ótima aproximação do cálculo de tensão efetiva para todos os materiais porosos saturados, nos quais a área de contato seja considerada desprezível e nos materiais nos quais a parte sólida seja mais compressível que a água que ocupa os vazios;
- Essa mesma equação se aplica para solos não saturados com ar ocluso.
- A presença de ar nos vazios do solo afeta a compressibilidade do solo, assim como o desenvolvimento de pressões na água.

### 2.3.2 Equações de resistência

A determinação dos parâmetros de resistência é feita com base em ensaios de laboratório, os quais procuram representar as condições existentes em campo. A resistência ao cisalhamento depende da história de tensões, tensão efetiva, composição do solo, índice e vazios, etc., portanto tenta-se resumir todos estes fatores na coesão e no ângulo de atrito.

A expressão mais utilizada é a de Mohr Coulomb, neste caso em termos de tensões totais. Ver Expressão (14).

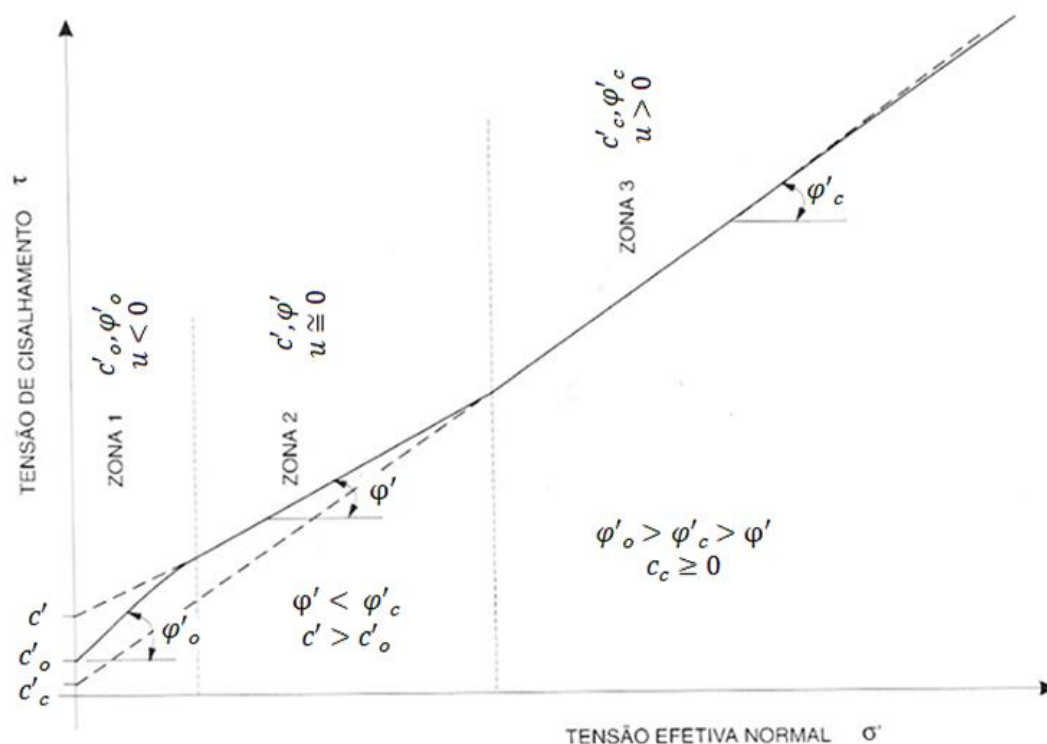
$$\tau = c + \sigma * \tan \varphi \quad (14)$$

Pode-se escrever a mesma expressão, só que em termos de resistência efetiva, conforme Expressão (15).

$$\tau = c' + \sigma' * \tan \varphi' \quad (15)$$

Segundo Mello (1977), a envoltória de resistência para solos residuais e colúvios compactados pode ser dividida em três trechos, como mostra a Figura 23.

**Figura 23** – Envoltória de resistência com três trechos para solos compactados.

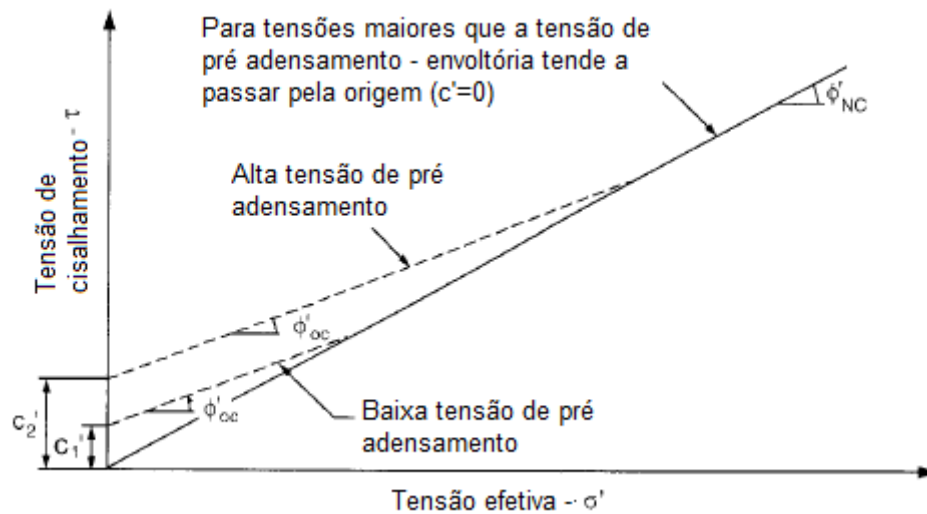


**Fonte:** Adaptado de Mello (1977) pela autora.

Na primeira zona, o valor da coesão se aproxima de zero e a curvatura é mais acentuada. Na segunda zona, existe um ganho de resistência devido ao efeito da compactação e da tensão de sucção, quando o corpo de prova não é saturado. Na terceira zona, observa-se que a envoltória é praticamente uma reta, os efeitos da compactação praticamente desaparecem e a pressão neutra é positiva.

A Figura 24 mostra como é a envoltória de resistência para argilas. Como é possível observar, quando o solo é submetido a tensões maiores que a tensão de pré-adensamento, a envoltória de resistência tende a passar pela origem, ou seja, a coesão efetiva é nula. Quando o solo argiloso possui uma tensão de pré-adensamento elevada, a coesão efetiva tende a ser mais elevada do que para uma argila com tensão de pré-adensamento mais baixa.

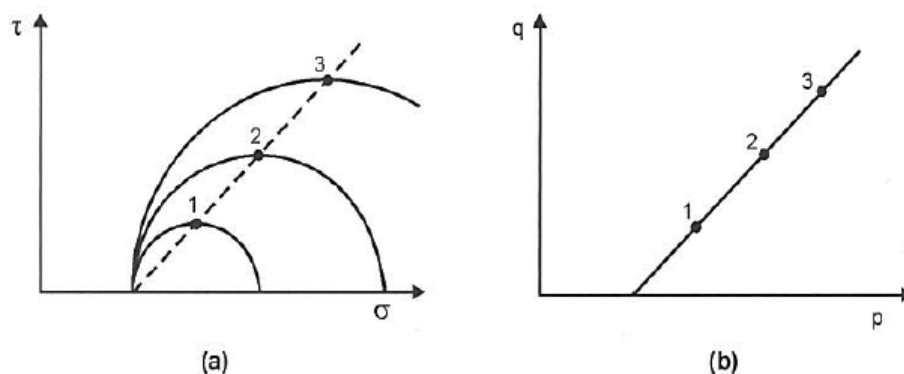
**Figura 24** – Envoltória de resistência para argilas.



**Fonte:** Adaptado de Duncan et al. (2005) pela autora.

Para obtenção dos parâmetros de resistência, pode-se utilizar o conceito de trajetória de tensões. Segundo Pinto (2006), trata-se de uma sistemática de representar as diversas fases de carregamento pela representação exclusiva dos pontos de maior ordenada de cada círculo de Mohr. Tais pontos são ligados por uma curva, a qual se chama trajetória de tensões. A Figura 25 mostra a evolução do estado de tensões representado pelo círculo de Mohr e representado pela trajetória de tensões.

**Figura 25** – Estado de tensões representado pelos círculos de Mohr (a) e pela trajetória de tensões (b).



**Fonte:** Pinto (2006).

As coordenadas de cada ponto que representam um círculo de Mohr são  $p$  e  $q$  e podem ser calculadas pelas expressões (16) e (17). O valor de  $p$  é igual a média das tensões principais, enquanto  $q$  é igual a semi-diferença das tensões principais.

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (16)$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (17)$$

A partir disso, obtém-se uma envoltória da trajetória de tensões, a qual é dada pela expressão (18).

$$q = d + p * \tan \beta \quad (18)$$

Os coeficientes da envoltória da expressão (18) podem ser correlacionados com os coeficientes da envoltória de resistência, coesão,  $c$ , e ângulo de atrito,  $\varphi$ . Esta demonstração pode ser feita geometricamente, usando convenientemente as semelhanças entre triângulos da Figura 26.

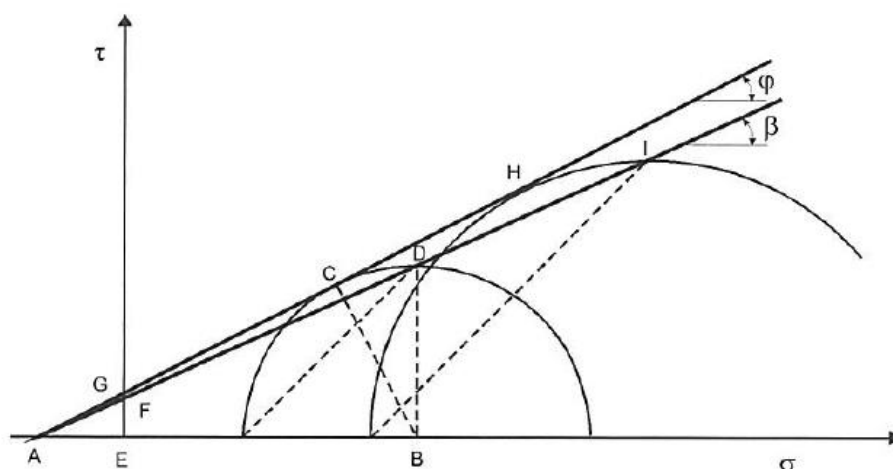
Observa-se que no triângulo ABD, o comprimento do segmento BD é igual a  $BD = AB * \tan \beta$ , e no triângulo ABC sabe-se que  $BC = AB * \sin \varphi$ . Sabendo também que  $BC = BD$ , têm-se:

$$\sin \varphi = \tan \beta \quad (19)$$

Sabe-se também que o intercepto  $c = EG = AE * \tan \varphi$  e o intercepto  $d = EF = AE * \tan \beta$ . Fazendo  $c/d$  e lembrando da relação  $\sin \varphi = \tan \beta$ , obtém-se:

$$c = \frac{d}{\cos \varphi} \quad (20)$$

**Figura 26** – Base para demonstração geométrica da correlação entre as envoltórias da trajetória de tensões e do círculo de Mohr.



**Fonte:** Pinto (2006).

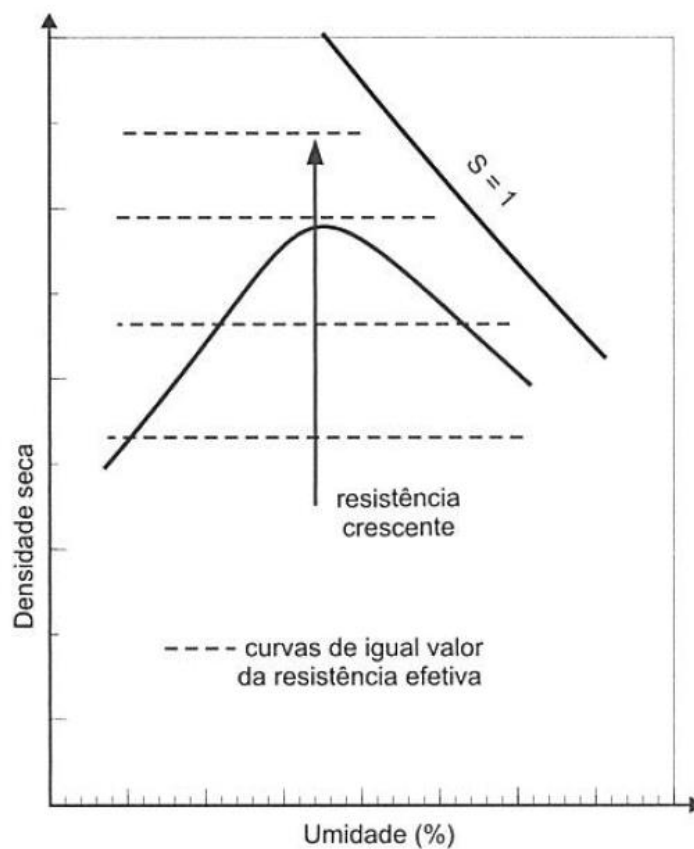
A partir da Figura 20, pode-se observar como varia a resistência em termos de tensão efetiva com a umidade e densidade de compactação. A Figura 27 mostra a tendência de variação da resistência, em termos de tensão efetiva, com a umidade e densidade de compactação. Conforme estudado por Pinto (2006), observa-se que a resistência em termos de tensão efetiva depende basicamente da densidade obtida, e não do teor de umidade no qual o solo se encontra, para ensaios CD ou CU.

Além disso, Pinto (1979) apresenta a conclusão dos estudos de Cruz (1963), no qual observou-se que a envoltória em termos de tensões efetivas para solos residuais compactados é praticamente independente das condições de compactação e do processo de ensaio.

Outra conclusão obtida a partir de estudos com solos siltosos da barragem de Jaguari também apresentada por Pinto (1979) mostra que os parâmetros de compactação influem essencialmente na coesão efetiva, enquanto o ângulo de atrito efetivo mantém-se constante.

As envoltórias de resistência, em termos de tensão efetiva, obtidas para ensaios do tipo CD ou CU, são ligeiramente curvas para tensões normais inferiores a um certo valor, conforme Figura 23, situando-se acima da envoltória linear que passa pela origem e corresponde ao comportamento de atrito de solo não compactado.

**Figura 27** – Tendência de variação da resistência, em termos de tensão efetiva, com a umidade e densidade de compactação, para ensaios triaxiais CD ou CU.



**Fonte:** Adaptado de Pinto (2006) pela autora.

### 2.3.3 Parâmetros de resistência de solos residuais compactados

Cruz (2006) e Maiolino (1985) discutiram o comportamento de solos residuais, no caso saprolíticos e lateríticos, compactados a partir de ensaios triaxiais. Foram realizados ensaios triaxiais adensados não drenados (CU) e com medida de pressão neutra. Os ensaios foram realizados com teor de umidade próximo à umidade ótima do ensaio de Proctor.

Os ensaios foram realizados basicamente com quatro grupos de solos, enumerados de I a IV, resultando em seis comportamentos típicos, enumerados de I a VI. Foi mantida a classificação apresentada por Cruz (1996).

O grupo I reúne solos lateríticos, de solos residuais originados de rochas intrusivas, extrusivas e metamórficas. Em geral, são solos argilosos estruturados com algum agente cimentício devido à presença de óxidos de ferro e de alumínio.

Correspondem geralmente à primeira camada do intemperismo, possuem porosidade elevada. São em grande parte argilosos.

Os solos do grupo II são chamados de solos saprolíticos, sendo, portanto, mais jovens e sofreram pouca ou nenhuma laterização. Correspondem a segunda camada do intemperismo. São compactos e heterogêneos, mais siltosos, guardando estrutura reliquiar da rocha matriz. Quando são retrabalhados, desagregam-se e perdem esta estrutura. São originários das mesmas rochas dos solos do grupo I. Quando compactados, são mais heterogêneos.

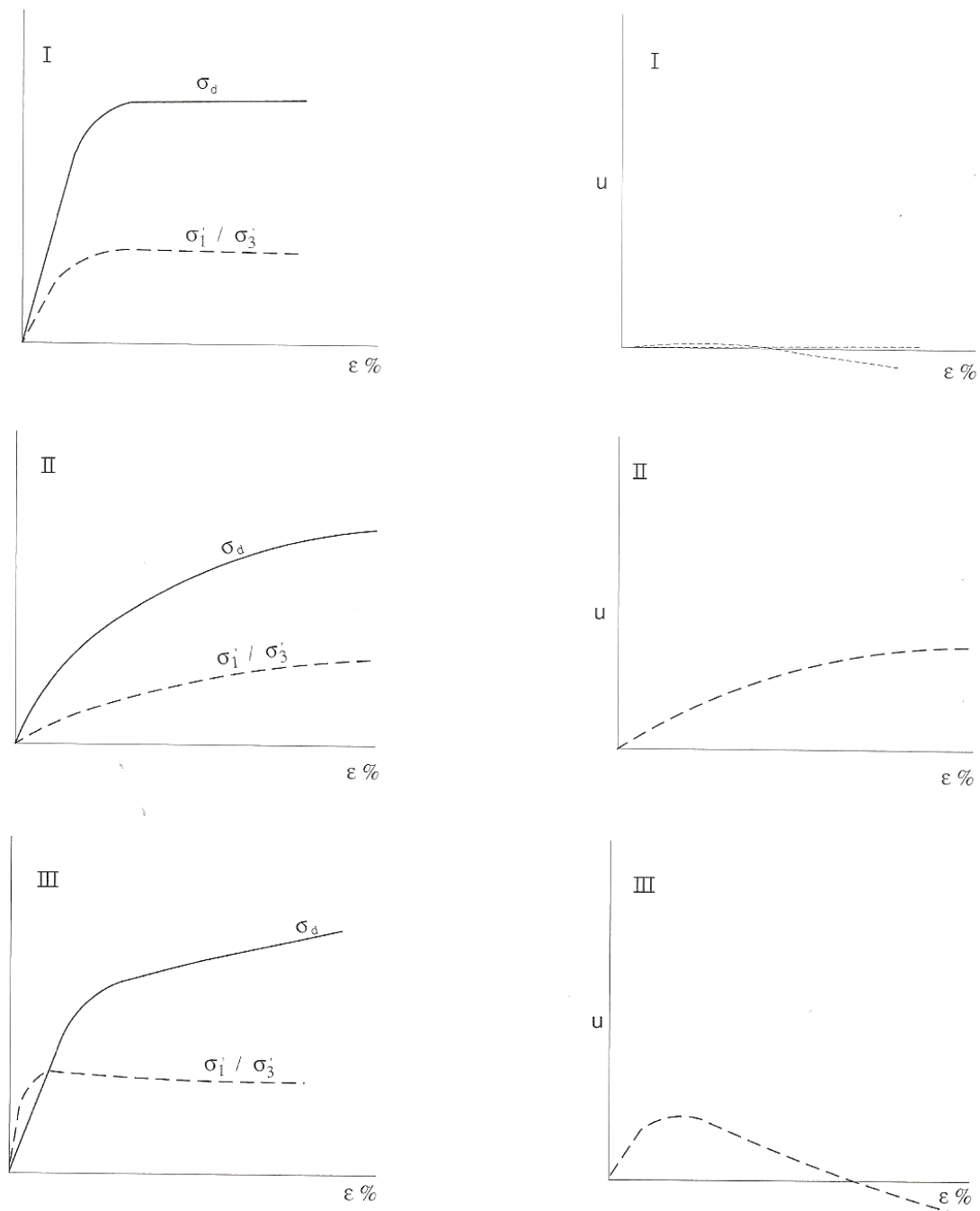
Os solos do grupo III são solos lateríticos arenosos, por vezes identificados como colúvios. São solos que sofreram mais com o fenômeno do transporte que os solos do tipo I e é comum encontrá-los misturados com outros solos. É o caso de solos provenientes do intemperismo do arenito, mas que contém fração argilosa proveniente dos solos de basalto.

Os solos do grupo IV são solos transportados, identificados como solos coluviais, originários de sedimentos. São pouco afetados pelo processo de laterização, podendo ser mais ou menos argilosos ou mais ou menos siltosos.

Assim, os solos foram separados em seis comportamentos tipos, conforme Figura 28 a Figura 30.

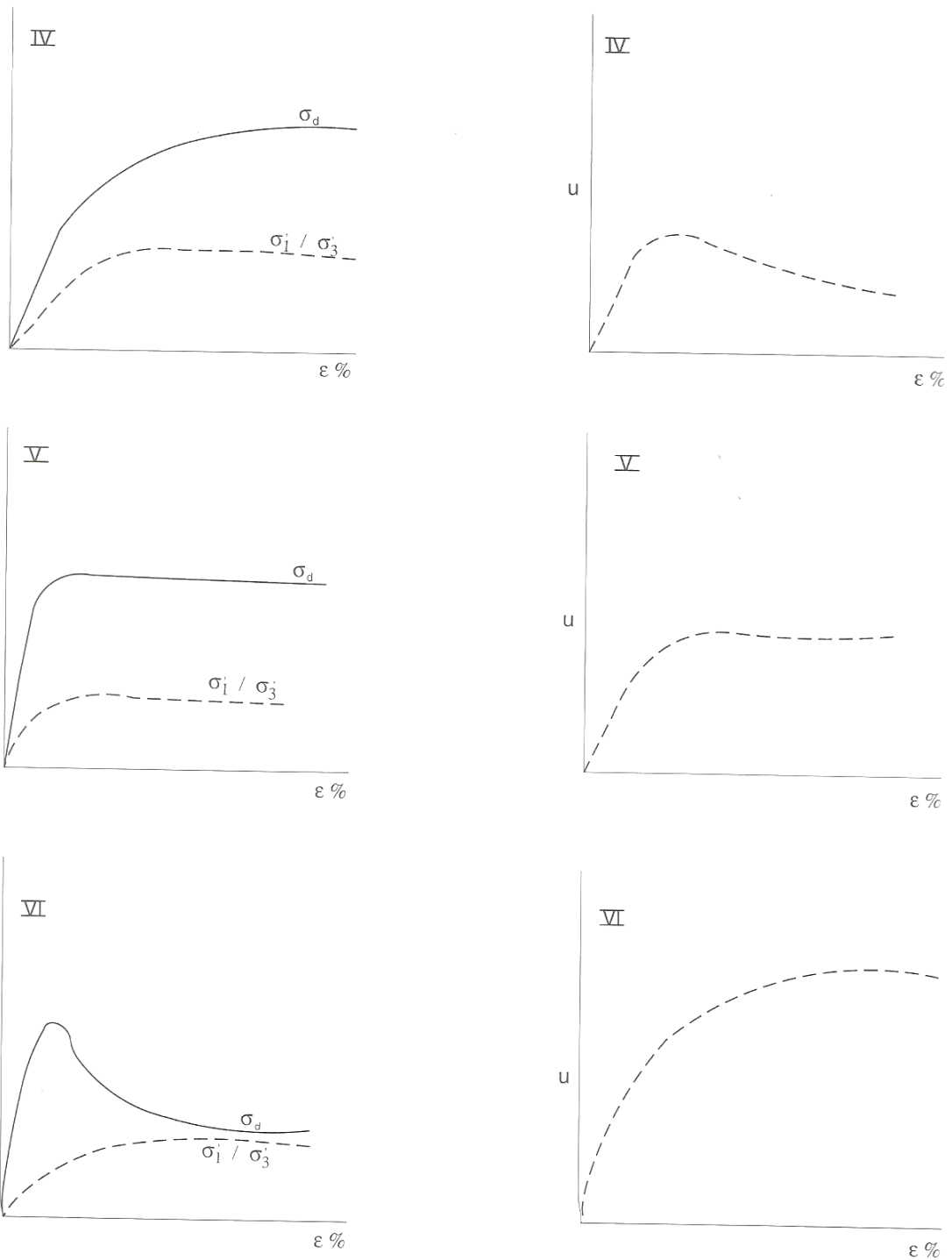


**Figura 28** – Curvas tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) e pressão neutra ( $u$ ) em função da deformação para três comportamentos típicos. Nota:  $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ .



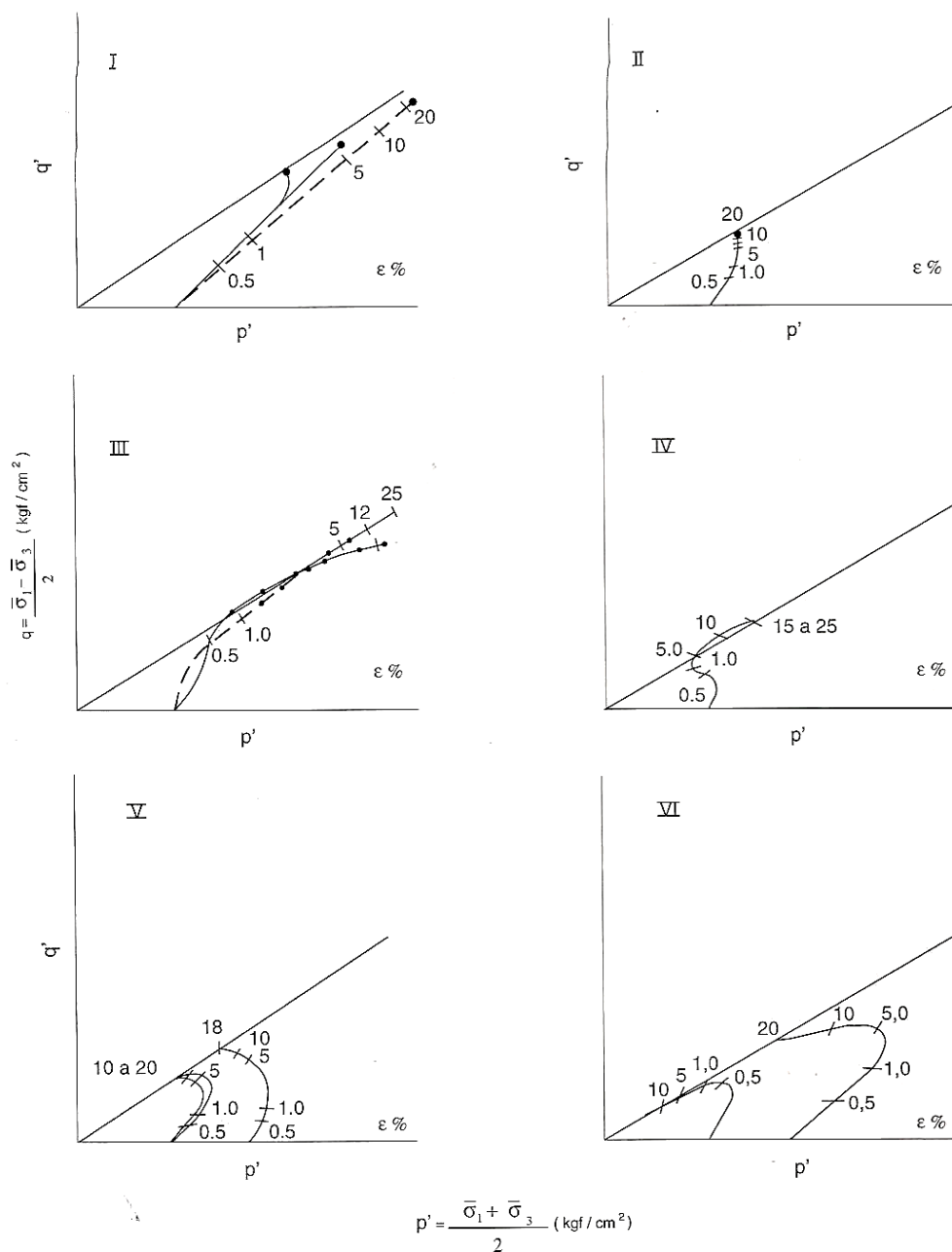
**Fonte:** Cruz e Maiolino (1983).

**Figura 29** – Curvas tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) e pressão neutra ( $u$ ) em função da deformação para três comportamentos típicos. Nota:  $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ .



**Fonte:** Cruz e Maiolino (1983).

**Figura 30** – Trajetórias de tensões efetivas  $p'$  e  $q'$ . Nota  $1 \text{ kg/cm}^2 \approx 100 \text{ kPa}$ .



**Fonte:** Cruz e Maiolino (1983). Nota: os números arábicos das figuras representam as deformações, em porcentagem.

Segundo Cruz (1996), no comportamento do tipo II, conforme Figura 28, ocorre a mobilização lenta da resistência e as deformações de ruptura tendem a ser elevadas. Além disso, a mobilização da pressão neutra é gradual.

Na Figura 30, no comportamento do tipo II, as deformações na ruptura tendem a ser elevadas. Além disso, o ponto de máxima tensão desviadora, ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ), e o ponto de máxima obliquidade são coincidentes. Trata-se de um comportamento típico de solos compactados no entorno e acima da umidade ótima.

O comportamento do tipo III, Figura 28, é característico de solos compactados saturados e rompidos a baixos valores de tensão. A máxima obliquidade é alcançada a baixos níveis de tensão. A pressão neutra é crescente até uma deformação específica próxima ao ponto de máxima obliquidade, sofrendo uma queda logo a seguir, podendo assumir valores negativos. Além disso, a trajetória de tensões praticamente tangencia a envoltória de resistência por uma larga faixa de deformações.

Na Figura 29, o comportamento dos solos do tipo IV também é bastante característico dos solos compactados e é semelhante ao comportamento de tipo III, diferindo apenas no fato de que a pressão neutra não assume valores negativos. O comportamento de tipo V, por sua vez, é característico de solos naturais pré-adensados, saturados ou quase saturados. Já o comportamento do tipo VI é característico de uma ruptura frágil, pouco comum entre solos compactados.

Na Figura 30, as trajetórias do tipo I são para ensaios drenados, nos quais não há desenvolvimento de pressão neutra. As trajetórias do tipo II, III e IV são para ensaios não drenados.

A Tabela 3 resume os dados de um grande número de ensaios em solos compactados, divulgados por vários autores, que serão utilizados posteriormente como valores de referência.

**Tabela 3 – Solos residuais compactados. Legenda: Ver a lista de símbolos.**

Litologia	% Argila < 2 $\mu$	Limites de Atterberg			Densidade dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{s,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	h <sub>ótima</sub> (%)	Não saturados		Saturados		Referência
		LL (%)	LP (%)	IP (%)				e'	$\phi'$ (°)	e'	$\phi'$ (°)	
Gnaíse	-	-	-	-	-	-	-	20 a 50	26 a 29	27	32	Cruz (1996)
Gnaíse - Barragem Euclides da Cunha (MT)	20	-	-	20	-	-	20,8	-	-	46	28,5	Maiolino (1985)
	15	-	-	21	-	-	18,5	-	-	53	31,5	Maiolino (1985)
Gnaíse - Solo saprolítico - Chapéu D'Uvas	14 a 33	-	-	9 a 14	-	-	17,5 a 20	-	-	-	-	Maiolino (1985)
	0 a 14	-	-	-	-	-	14,9 a 17,5	-	-	73	28	Maiolino (1985)
Gnaíse - Ponte Nova	16	50	32	18	27,8	16,4	18,8	18	30	-	-	Cruz (1967)
Granito - V. Galvão	6	36	22	15	27,2	16,2	19,8	10	28	-	-	Cruz (1967)
Quartzo- Xisto	-	-	-	-	-	-	-	15	33	-	-	Cruz (1996)
Granito	-	-	-	-	-	-	-	20 a 90	25 a 28,5	10 a 45	24,5 a 33	Cruz (1996)
Filito Aterro sanitário em Caieras (SP) - Ensaio de cisalhamento direto inundado	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,9	32,2	Soares (2012)
Filito - Barragem Manso (SP)	8 a 19	-	-	18 a 26	-	-	21 a 26	-	-	12	31,5	Maiolino (1985)
Filito - Juqueri A	5	44	30	14	27,6	16,1	21,7	18	31,5	-	-	Cruz (1967)
Filito - Juqueri C	5	41	29	12	27,8	16,7	19,1	5	30	-	-	Cruz (1967)
Filito E. O.	4	44	22	22	28,1	16,3	17,9	0	33	-	-	Cruz (1967)
Metassedimento - Solo residual maduro	-	51	29	22	28,0	-	-	-	-	25	26	Dib (1985b)
Metassedimento - Solo saprolítico	-	38	23	15	27,7	-	-	-	-	0	34	Dib (1985b)
Metassedimento - Tucuruí (AM)	23 e 32	-	-	20 a 27	-	-	21,5 a 23,5	-	-	28	28,5	Maiolino (1985)
Argilito - Itaparica	40	57	21	36	-	16,05	23,0	-	-	-	-	GRUPO I - Cruz (1996)
Basalto - Três Irmãos	62	73	31	42	28,4	14,51	30,0	-	-	-	-	GRUPO I - Cruz (1996)
Migmatito - Juquiá I	44	66	35	31	28,1	14,57	25,6	-	-	-	-	GRUPO I - Cruz (1996)
Migmatito - Juquiá II	18	44	23	21	28,3	16,96	19,5	-	-	-	-	GRUPO I - Cruz (1996)
Rocha alcalina - Poços de Caldas	50	48	28	20	28,6	13,75	28,4	-	-	-	-	GRUPO I - Cruz (1996)
Basalto - Itaipu	78	59	26	33	28,6	14,94	29,3	-	-	-	-	GRUPO I - Cruz (1996)
Granito e Biotita - Itaparica	2	n.p*	n.p*	n.p*	27,0	18,79	14,5	-	-	-	-	GRUPO II - Cruz (1996)
Basalto - Nova Avanhandava	50	86	55	31	30,2	12,80	38,5	-	-	-	-	GRUPO II - Cruz (1996)
Gnaíse - Euclides da Cunha	14	48	29	19	27,1	17,14	16,4	-	-	-	-	GRUPO II - Cruz (1996)
Migmatito - Passaúna	21	50	36	14	-	15,40	25,7	-	-	-	-	GRUPO II - Cruz (1996)
Xisto e Migmatito - Emborcação	10	46	27	19	26,7	16,05	18,9	-	-	-	-	GRUPO II - Cruz (1996)
Colúvio (Arenito + Basalto) - Três Irmãos	38	33	21	12	27,8	18,47	15,4	-	-	-	-	GRUPO III - Cruz (1996)
Colúvio (Arenito + Basalto) - Rosana	30	26	14	12	27,1	19,53	11,0	-	-	-	-	GRUPO III - Cruz (1996)
Colúvio (Arenito) - Porto Primavera	8	n.p*	n.p*	n.p*	26,9	19,90	9,9	-	-	-	-	GRUPO III - Cruz (1996)
Sedimentar - Tucuruí	31	38	20	18	27,0	18,48	13,4	-	-	-	-	GRUPO IV - Cruz (1996)
Sedimentar - Tucuruí	18	29	16	13	27,0	19,20	11,0	-	-	-	-	GRUPO IV - Cruz (1996)

\* não plástico

**Fonte:** Adaptado de Cruz (1967), Cruz (1996), Maiolino (1985), Soares (2012) e Dib (1985b) pela autora.

## 2.4 PARAMETRO DE PRESSÃO NEUTRA, $\bar{B}$

Segundo Cruz (1996), solos compactados podem conter ar sob a forma contínua ou sob a forma de ar ocluso, fato que pode desencadear o desenvolvimento de pressão da água quando submetidos a tensões de cisalhamento.

Um dos parâmetros que medem mudanças na pressão neutra é o  $\bar{B}$ , dado pela Expressão (21).

$$\bar{B} = \frac{u}{\sigma'_v} \quad (21)$$

Sendo:

$\sigma'_v$  é a tensão vertical efetiva em um ponto;

u: pressão neutra, obtida em laboratório ou medida no campo.

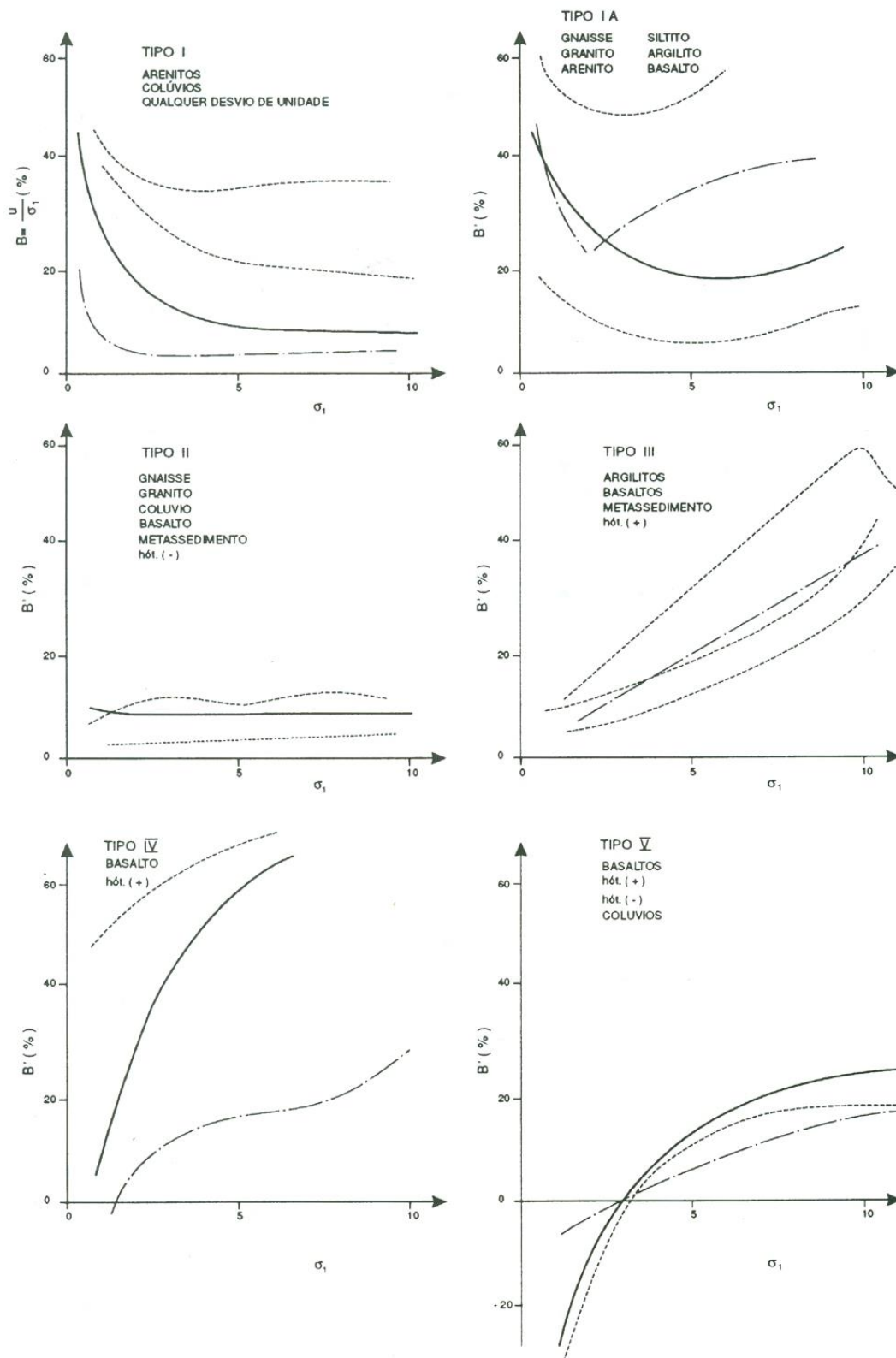
A medição da pressão neutra em laboratório, simulando-se as condições de alteamento de um aterro compactado, é feita em ensaios triaxiais PN, em que se mantém constante a relação  $\sigma_3/\sigma_1$ .

As Figura 31 e Figura 32 mostram a variação do parâmetro  $\bar{B}$  com a tensão principal máxima e com o desvio de umidade em relação à umidade ótima, para os 5 grupos de solos estudados por Cruz (1996), citados no item 2.3.3.

Como é possível observar, o valor de  $\bar{B}$  varia muito para solos de mesma origem. Solos do grupo I, III e IV podem apresentar elevados valores de  $\bar{B}$ , da ordem de 60%. Já solos do tipo II e V podem apresentar valores mais baixos de  $\bar{B}$ .

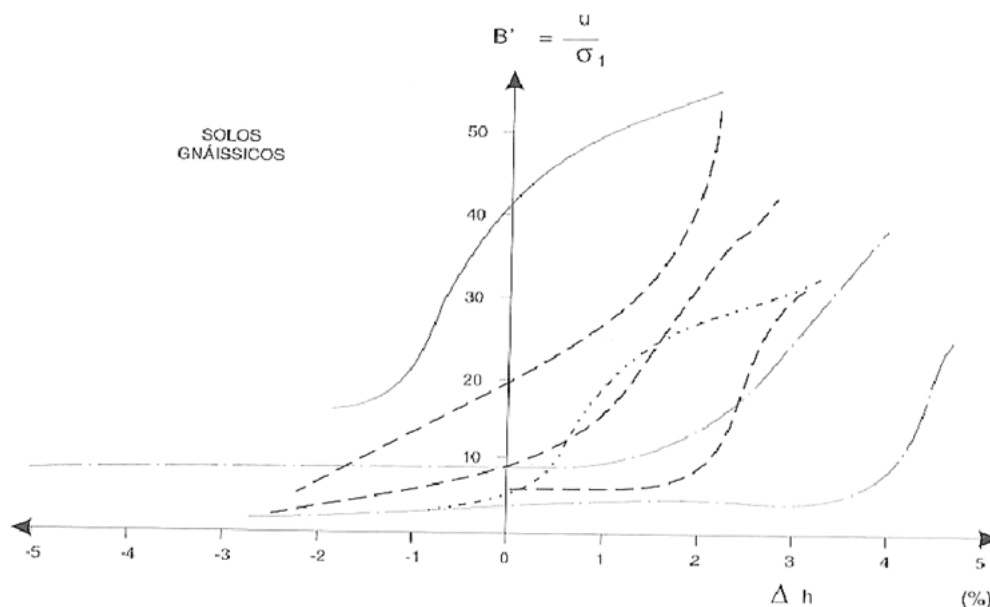
Já para os solos de gnaisse, observa-se que para desvios de umidade em relação a ótima mais baixos (-5% a 1%), o valor de  $\bar{B}$  é menor, da ordem de 0% a 10%. Para valores de desvios maiores que 2%, o valor de  $\bar{B}$  pode se elevar rapidamente, podendo atingir até 50%.

**Figura 31 -** Parâmetro  $\bar{B}$  versus tensão principal máxima,  $\sigma_1$ .



Fonte: Cruz (1996).

**Figura 32** – Parâmetro  $\bar{B}$  versus variação entre umidade de compactação e umidade ótima.



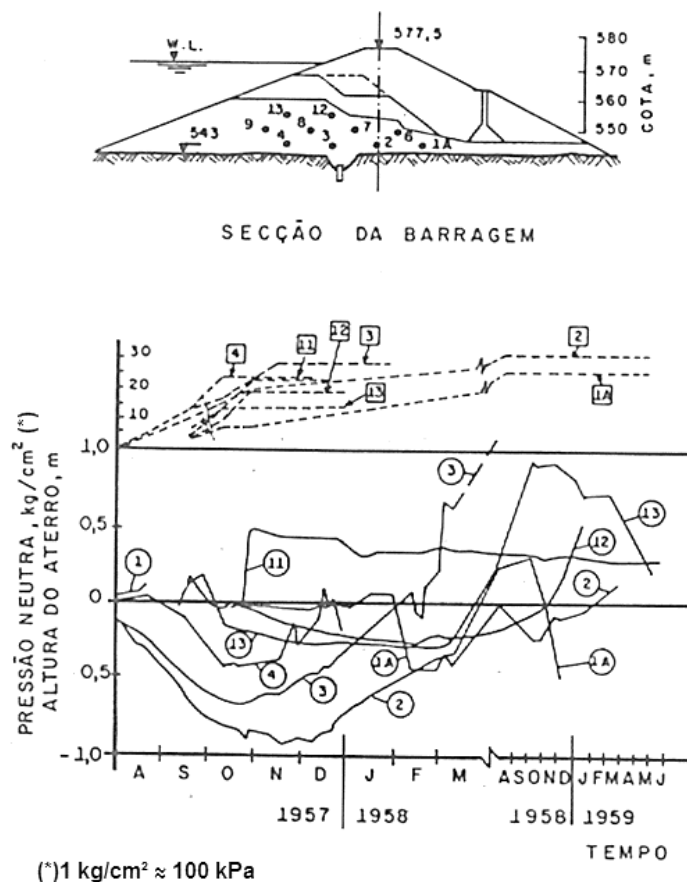
**Fonte:** Cruz (1996).

A Figura 33 mostra um exemplo real, relativo à barragem de Limoeiro, na qual os piezômetros indicam que as pressões neutras eram negativas no início da construção e continuaram a decrescer durante o alteamento do aterro. Os valores de pressão neutra só passaram a aumentar e atingiram valores positivos quando um determinado nível de carregamento é atingido.

Pacheco Silva (1972) explica o fato de ocorrer pressões neutras negativas utilizando uma analogia com o comportamento de tubos capilares equivalentes: quando o solo é comprimido, os capilares diminuem de tamanho, aumentando a pressão de sucção. O ar presente nos vazios está na pressão atmosférica, pois para solos com baixo grau de saturação, os poros preenchidos por ar são intercomunicantes. Esta tensão capilar depende da distribuição e do tamanho dos vazios sendo, portanto, relacionada com a granulometria, a origem geológica do solo, o índice de vazios, o grau de saturação e o método de compactação do solo, que afeta a estrutura do solo compactado. Pacheco Silva introduziu o conceito de “diâmetro capilar equivalente”, que é o diâmetro de um tubo capilar que corresponde a uma mesma tensão de tração na água. Aumentando o grau de saturação, o ar fica bloqueado e a pressão de água tende a subir.



**Figura 33** – Desenvolvimento de pressões neutras na barragem de Limoeiro.



**Fonte:** Pacheco Silva (1966).

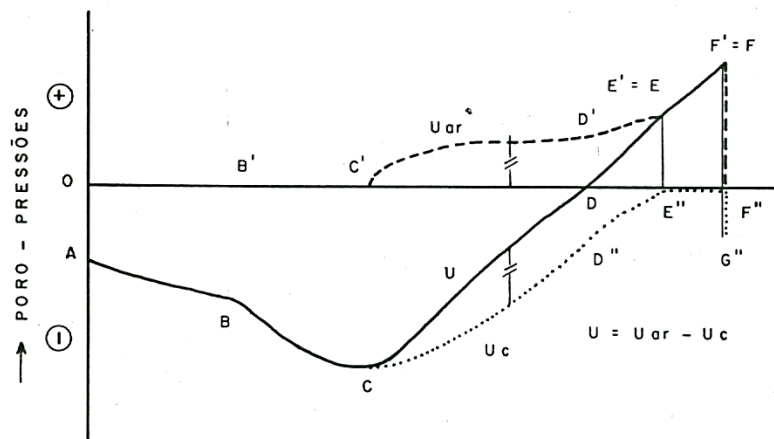
A Figura 34 representa a evolução de pressões nas camadas profundas de um aterro compactado. Sabe-se que a curva tracejada representa a evolução das pressões no ar, a curva de linha contínua representa a pressão na água e a curva pontilhada, as tensões capilares. Como é possível observar, o ar se conserva na pressão atmosférica durante a construção até o ponto C'. Neste ponto, a pressão da água evolui até  $u_c$  (maior valor absoluto de pressão neutra negativa). Pode-se explicar este comportamento supondo que o diâmetro capilar equivalente atingiu seu valor mínimo em C.

A partir deste ponto, parte do ar entra em solução na água e parte permanece sob pressão. Este ar que permanece sob pressão aumenta gradativamente, segundo o trecho C'D', e a tensão capilar passa a diminuir. O valor da pressão na água ( $u$ ) é igual a pressão do ar ( $u_{ar}$ ) subtraída a pressão capilar ( $u_c$ ).

A partir do ponto D, são atingidas pressões positivas na água. No ponto E atinge-se a saturação completa, correspondente a tensão capilar nula (ponto E'').

O ponto F representa o fim da construção.

**Figura 34** – Desenvolvimento de pressões neutras em um aterro compactado.



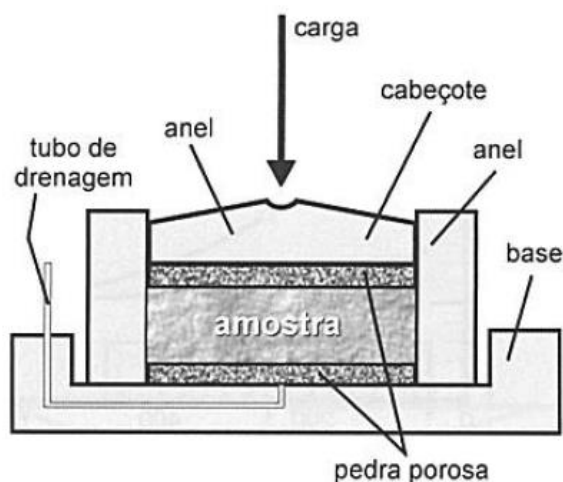
**Fonte:** Pacheco Silva (1972).

## 2.5 COMPRESSIBILIDADE, DEFORMABILIDADE E EXPANSIBILIDADE

### 2.5.1 Parâmetros de compressibilidade

A compressibilidade é uma relação entre variação de volume e tensão efetiva. A Figura 35 mostra um esquema de montagem do ensaio de adensamento edométrico, muito utilizado para obtenção dos parâmetros de compressibilidade.

**Figura 35** – Montagem do ensaio edométrico.



**Fonte:** Pinto (2006).

O ensaio consiste na compressão de uma amostra de solo confinada num anel metálico, compactada ou indeformada, com a aplicação de valores crescentes de tensão vertical, sob a condição de deformação radial nula.

O ensaio utiliza a amostra entre duas pedras porosas, como visto na Figura 35, a fim de acelerar a velocidade dos recalques da amostra e diminuir o tempo de ensaio. Durante cada carregamento, são realizadas leituras dos recalques e do tempo passado.

A partir deste ensaio de compressão edométrica, obtém-se os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de compressibilidade,  $a_v$ :

$$a_v = -\frac{de}{d\sigma_v} \quad (22)$$

- Coeficiente de compressibilidade volumétrica,  $m_v$ :

$$m_v = \frac{d\varepsilon_v}{d\sigma'_v} = \frac{a_v}{1 + e_0} \quad (23)$$

- Módulo de deformabilidade edométrico,  $M$ :

$$M = \frac{1}{m_v} = \frac{d\sigma'_v}{d\varepsilon_v} \quad (24)$$

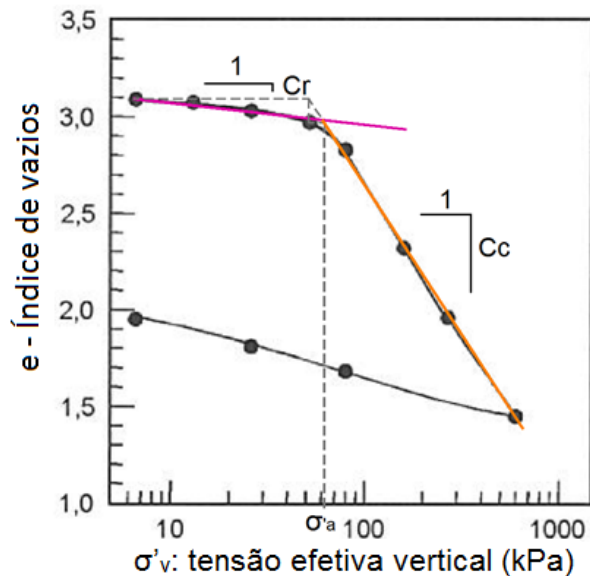
- Índice de compressão,  $C_c$ , conforme o gráfico de índice de vazios em função do logarítmico da tensão vertical (Figura 36).

$$C_c = -\frac{de}{d(\log \sigma'_v)} \quad (25)$$

- Índice de recompressão,  $C_r$ , conforme o gráfico de índice de vazios em função do logarítmico da tensão vertical (Figura 36).

$$C_r = -\frac{de}{d(\log \sigma'_v)} \quad (26)$$

**Figura 36** - Gráfico de índice de vazios em função do logarítmico da tensão vertical obtido a partir do ensaio de adensamento.



**Fonte:** Autora.

Sendo:

$\varepsilon_v$ : Deformação volumétrica;

$e$ : índice de vazios;

$\sigma'_v$ : tensão efetiva vertical.

Os decréscimos de volume do solo podem ser atribuídos a três fatores:

- Redução do índice de vazios  $e$ , conseqüentemente, com a expulsão da água (para solos saturados);

- Compressão do ar existente nos vazios no solo;
- Compressão das partículas sólidas.

A Tabela 4 mostra alguns valores médios de  $C_c$  e  $\sigma'_a$  de ensaios de adensamento edométricos em amostras indeformadas extraídas do corpo da barragem de Tucuruí (AM) obtidos por Dib (1985b). A compactação do solo da barragem foi realizada com as seguintes especificações:  $GC=98\%$  e  $\Delta h=\pm 2\%$ .

**Tabela 4** – Valores médios da tensão de pré-adensamento,  $\sigma'_a$  e do índice de compressão,  $C_c$ .

Litologia	Referência	Limites de Atterberg			Densidade dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{s,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	hótima (%)	$\sigma'_a$ (kPa)	$C_c$
		LL (%)	LP (%)	IP (%)					
Metassedimento - Solo residual maduro - Barragem de Tucuruí (*)	Dib (1985b)	55	28	27	28,1	15,8	25	-	-
Metassedimento - Solo saprolítico - Barragem de Tucuruí (*)		44	23	21	28,0	16,3	20,8	500	0,19

(\*) Valores médios

**Fonte:** Adaptado de Dib (1985b) pela autora.

Dib (1985b) também apresenta as correlações obtidas, conforme equações 27, 28 e 29.

$$C_c = 0,30 * e_0^{1,18} \quad (R^2 = 0,80) \quad (27)$$

$$C_c = 0,01 * h^{1,10} \quad (R^2 = 0,80) \quad (28)$$

$$C_c = 8,95 * e^{-2,34*\gamma_s} \quad (R^2 = 0,82) \quad (29)$$

Sendo:

- $0,33 < e_0 < 1,31$ ;
- $7\% < h < 38\%$ ;
- $12,9 \text{ kPa} < \gamma_s < 20,2 \text{ kPa}$

## 2.5.2 Parâmetros de deformabilidade

A deformabilidade dos solos, por sua vez, é um parâmetro de extrema importância, comparando-se com a importância dos parâmetros de resistência,

que foram descritos no item 2.3.3, uma vez que o estado limite de serviço de uma determinada obra pode ser alcançado antes do estado limite último.

A Figura 37 mostra uma curva tensão *versus* deformação de um ensaio triaxial. Pode-se observar que o início da curva as deformações são de natureza pseudo-elástica e, neste trecho, pode-se definir o módulo de deformabilidade do solo.

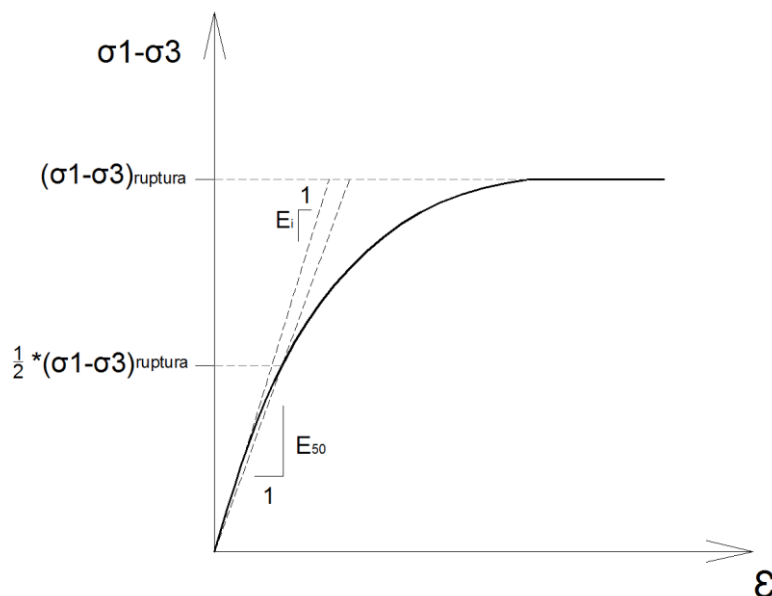
A Expressão (30) mostra como é possível obter o módulo de deformabilidade tangente inicial,  $E_i$ , através do ensaio triaxial. Trata-se de uma expressão simplificada para o trecho pseudo-elástico.

$$E_i = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon} \quad (30)$$

O módulo de deformabilidade secante a 50% da tensão de ruptura,  $E_{50}$ , pode ser obtido conforme a Figura 37.

Como foi visto acima, o módulo de compressão edométrica,  $M$ , é diferente do módulo de deformabilidade,  $E$ . Pode-se obter o módulo de deformabilidade a partir do módulo de compressão edométrica, em função do coeficiente de Poisson,  $\nu$ , utilizando a Expressão (31).

**Figura 37** – Cálculo do módulo de deformabilidade tangente inicial ( $E_i$ ) e do módulo de deformabilidade secante a 50% da tensão de ruptura ( $E_{50}$ ).



**Fonte:** Autora.

$$E = M * \left[ 1 - \left( \frac{2 * \nu^2}{1 - \nu} \right) \right] \quad (31)$$

Segundo Cruz (1996), a utilização de ensaios de laboratório para obtenção do módulo de deformabilidade pode conduzir a previsão de recalques superiores aos que realmente ocorrerão em aterros compactados. Tal fato deve-se principalmente aos seguintes motivos:

- Impossibilidade de reproduzir em laboratório o estado de tensões que ocorre *in situ*;
- Utilização de amostras moldadas em laboratório, as quais tem uma estrutura diferente do material encontrado em campo. Mesmo quando são utilizadas amostras talhadas de blocos existe dificuldade em avaliar as deformações volumétricas que ocorrem no desconfinamento da amostra e no transporte;
- Medida incorreta das deformações resultantes devido a compressibilidade do próprio aparelho de ensaio.

Assim, os módulos de deformabilidade e de compressão edométrica obtidos em laboratório podem ser utilizados em projeto com certo critério.

Na literatura técnica há um registro feito por Massad et al. (1978) apresenta um estudo de aterro úmido compactado no núcleo da Barragem do Rio Verde, próxima a Curitiba, com grau de compactação médio de 95% e desvios de umidade variando entre 0 e +6%; os solos eram argilas siltosas ou silte argilosos, de decomposição de gnaiss migmatizado. Os módulos de deformabilidade secantes, estimados com base em deformações medidas entre placas de medidores de recalques telescópicos tipo IPT, variam na faixa de 6.500 a 13.000 kPa. Em contraposição, quando a compactação se dá em torno do ponto ótimo, os módulos são mais elevados, podendo atingir valores entre 30.000 e 60.000 kPa ou mais (conf. Massad et al., 1978 e Silveira, 2006).

### 2.5.3 Parâmetros de expansibilidade

Conforme visto no item 2.2.7 nas especificações de compactação para aterros do DER e do DNIT, existe um valor limite de expansão para os solos a serem utilizados nos aterros de obras rodoviárias quando em contato com a água.

Variações de umidade podem provocar retrações ou expansões, com o aparecimento de trincas, principalmente no pavimento. Entre as principais características de solos expansivos pode-se citar o efeito da redução da sucção e, conseqüentemente, a redução da resistência ao cisalhamento.

Um dos parâmetros de expansibilidade a ser considerado é a pressão de expansão e, para sua determinação, pode-se utilizar o ensaio de adensamento edométrico. Reportando-se à Figura 35, os corpos de prova, contidos em anel metálico, são colocados na prensa com pedra porosa seca e carregados até a pressão de inundação. A partir disso, obtém-se a variação volumétrica do corpo de prova até a estabilização. O carregamento é adicionado, a fim de se obter qual o carregamento necessário para compensar a expansão do solo, isto é, a fim de obter o índice de vazios inicial ou menor valor.

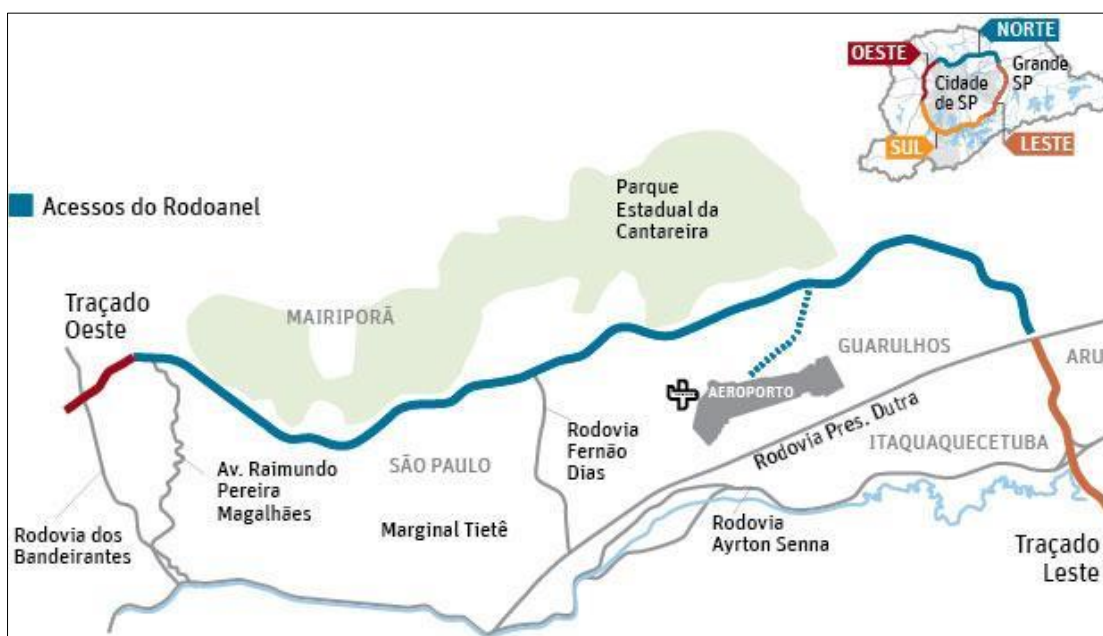
A partir disso, é possível obter a pressão de expansão, que é igual à carga que retorna ao índice de vazios inicial, portanto, antes da inundação. Segundo Santos (1990), a umidade controla o gradiente das curvas de expansão e a densidade controla a pressão de expansão.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos foram realizados com os dados coletados a partir de um projeto de aterros compactados dos lotes 14 e 15 do Rodoanel Norte, localizado na Região Metropolitana de São Paulo. A Figura 38 mostra um mapa da região do Rodoanel Norte, responsável pela ligação dos trechos Oeste e Leste e facilitando o acesso as Rodovias Presidente Dutra, Fernão Dias e ao Aeroporto Internacional de Guarulhos.

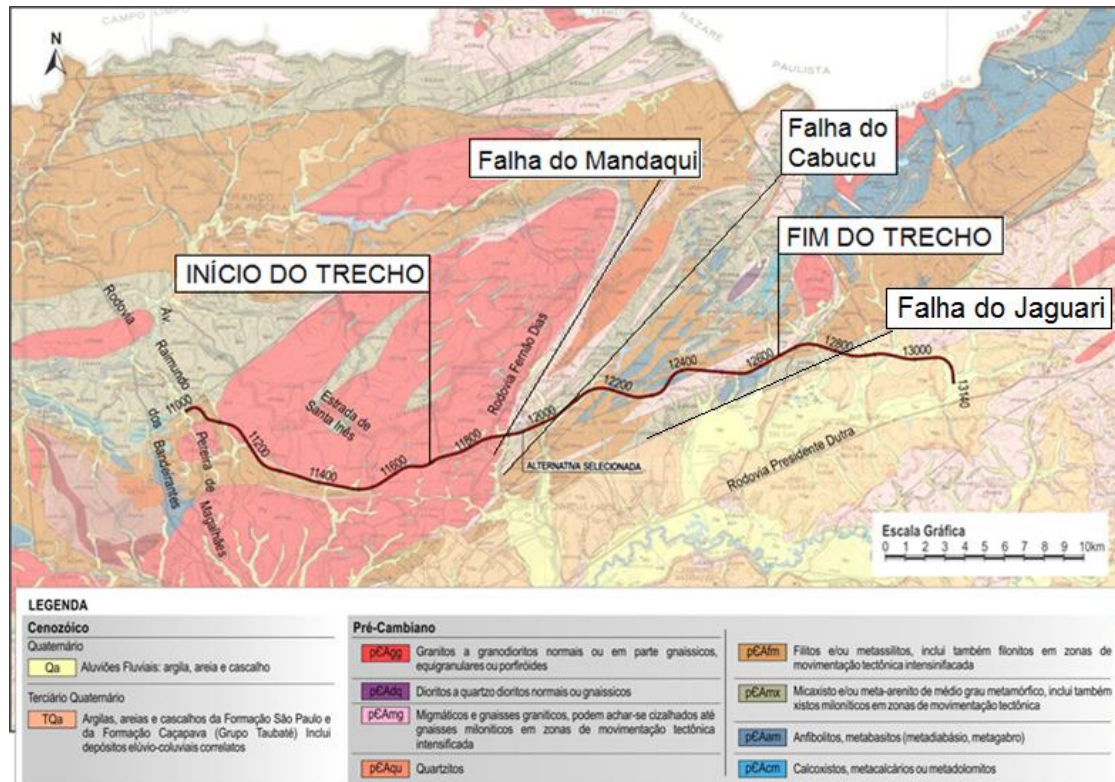
**Figura 38** – Rodoanel Norte.



**Fonte:** Folha de São Paulo.

A Figura 39 mostra o mapa geológico da região, com indicações do início e do fim do trecho em estudo.

**Figura 39** – Mapeamento geológico da região, com indicação do início e do fim do trecho em estudo.



**Fonte:** Extraído e adaptado da Carta Geológica da Região Metropolitana da Grande São Paulo, escala 1:100.000, Emplasa, 1980.

A partir do mapa geológico da Figura 39 é possível observar que a região de estudo é formada basicamente por solos residuais. Os ensaios analisados abrangeram solos compactados resultantes da decomposição de rocha de filitos, granitos pouco milonitizados, metabásicas e ultramilonitos. Apresenta-se, a seguir, uma descrição de cada litologia, baseada em Teixeira et al (2009).

- Filitos – São rochas metamórficas muito foliadas, com evidente estratificação, caracterizadas pela xistosidade finamente espaçada e pela granulação muito fina.

- Granitos pouco milonitizados - Rochas granitóides que sofreram metamorfismo dinâmico, ao longo de zonas de cisalhamento, de baixa intensidade. Possuem baixa taxa de recristalização e deformação mineral, sendo possível reconhecer a textura ígnea reliquiar do protolito (rocha fonte).

- Ultramilonitos – São rochas coesivas com granulação fina e estrutura foliada provenientes de metamorfismo dinâmico, ao longo de zonas de

cisalhamento, apresentando recristalização dos minerais. São caracterizadas pela presença de porfiroclastos, sendo a proporção entre porfiroclastos e rocha matriz superior a 90%.

- Metabásicas – São rochas geradas a partir do metamorfismo de ígneas básicas (gabro).

Os ensaios realizados objetivaram caracterizar os aterros compactados, no que diz respeito à geração de poropressões, resistência ao cisalhamento, deformabilidade, compressibilidade e expansibilidade.

Os ensaios realizados foram:

- Ensaio de caracterização:
  - Granulometria;
  - Peso específico dos grãos;
  - Limites de Atterberg;
  - Compactação Proctor Normal;
  - Teor de umidade natural;
  - Ensaio de difração raio X.
- Ensaio triaxiais tipo UU sem saturação e tipo CU saturado por contra-pressão, com medida de pressão neutra e tensões confinantes de 50, 100, 200 e 400 kPa;
- Ensaio triaxiais PN, onde foi possível obter o parâmetro de pressão neutra,  $\bar{B}$ , e o módulo de deformabilidade tangente inicial,  $E_i$ , com relação  $k = \sigma_1 / \sigma_3 = 0,50$ .
- Ensaio de adensamento edométrico para medição da tensão de pré-adensamento, dos coeficientes de compressibilidade, do índice de compressão e da pressão de expansão;

Os ensaios triaxiais UU, também conhecidos por ensaios triaxiais rápidos-rápidos, são dos mais utilizados para obter parâmetros de resistência de aterros compactados na condição “final de construção” dos aterros, portanto com solos não-saturados. Admite-se que não há tempo para a dissipação de excessos de pressão neutra, portanto, os ensaios triaxiais são feitos sem adensamento e os corpos de prova são rompidos rapidamente. No presente caso, seguindo prática

usual, a firma projetista dos aterros compactados dos lotes 14 e 15 do Rodoanel Norte não previu ensaios com medida de sucção.

Os ensaios triaxiais CU, também conhecidos por ensaios triaxiais adensados rápidos, são utilizados para obter parâmetros de resistência de aterros compactados na condição de “operação” dos aterros. Admite-se que as pressões neutras de construção se dissiparam e que eventual instabilização possa ocorrer após saturação do aterro, por influência de precipitações pluviométricas. Portanto, os ensaios são feitos em corpos de prova saturados, impondo-se carregamentos rápidos até a ruptura.

As Figura 40 a Figura 43 contém algumas fotos das amostras submetidas aos ensaios de laboratório.

**Figura 40** – Amostra nº 7 (Granito milonitizado).



**Fonte:** Arquivo pessoal.

**Figura 41** – Amostra nº 2 (Filito).



**Fonte:** Arquivo pessoal.

**Figura 42** – Amostra nº 4 (Ultramilonito).



**Fonte:** Arquivo pessoal.

**Figura 43** – Amostra nº 5 (Metabásica).



**Fonte:** Arquivo pessoal.

As Figura 44 a Figura 47 ilustram afloramentos na região do Rodoanel Norte de onde foram extraídas as amostras para os ensaios.

**Figura 44** – Afloramento de Filito.



**Fonte:** Arquivo pessoal.

**Figura 45** – Afloramento de Granito Cantareira.



**Fonte:** Arquivo pessoal.

**Figura 46** – Afloramento de Granito Milonitizado.



**Fonte:** Arquivo pessoal.

**Figura 47** – Afloramento de Metabásica.



**Fonte:** Arquivo pessoal.



## 4 RESULTADOS

### 4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

A Tabela 5 lista as amostras ensaiadas, indicando a litologia, a descrição tátil-visual e a profundidade de sua extração. Como é possível observar, foram realizados ensaios em sete amostras, sendo duas de Filito, uma de Granito Milonitizado, uma de Metabásica, duas de Ultramilonito e uma com uma mistura entre Filito e Metabásica. As profundidades de retirada dos blocos variaram de 0 a 10 m. Os solos possuem textura basicamente siltosa, variando entre arenoso e argiloso.

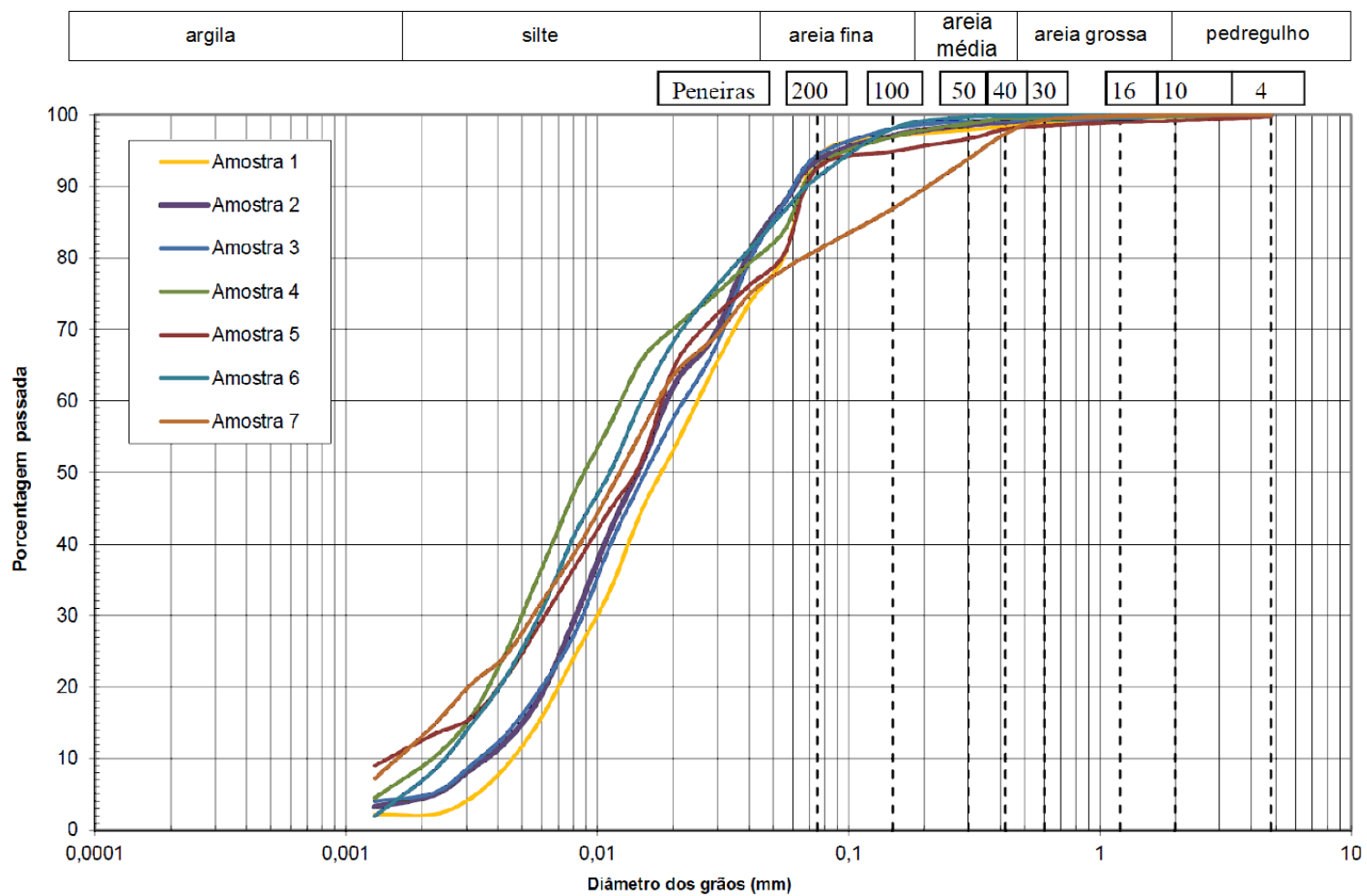
**Tabela 5 – Solos ensaiados.**

Amostra	Litologia	Descrição tátil-visual	Profundidade (m)
1	Filito/Metabásica	Silte arenoso pouco argiloso marrom claro amarelo e cinza	0,0 a 0,50
2	Filito	Silte arenoso pouco argiloso marrom claro	0,0 a 0,50
3	Filito	Silte arenoso pouco argiloso marrom amarelado	1,70 a 3,00
4	Ultramilonito	Silte argiloso pouco arenoso, marrom, cinza e amarelo	10,0
5	Metabásica	Silte argiloso pouco arenoso, marrom escuro e amarelo	4,5
6	Ultramilonito	Silte argiloso pouco arenoso roxo	10,0
7	Granito pouco milonitizado	Silte arenoso marrom avermelhado	4,5

**Fonte:** Autora.

A Figura 48 mostra as curvas granulométricas (NBR 7181, 1984) dos materiais ensaiados, cujas frações estão indicadas na Tabela 6. Observa-se a predominância da fração de silte em todas as amostras, variando de, aproximadamente, 64% a 82%, seguida pela fração de argila, variando de, aproximadamente, 2% a 17%.

**Figura 48** - Curvas de distribuição granulométrica dos solos ensaiados, de acordo com a NBR 7181/84.

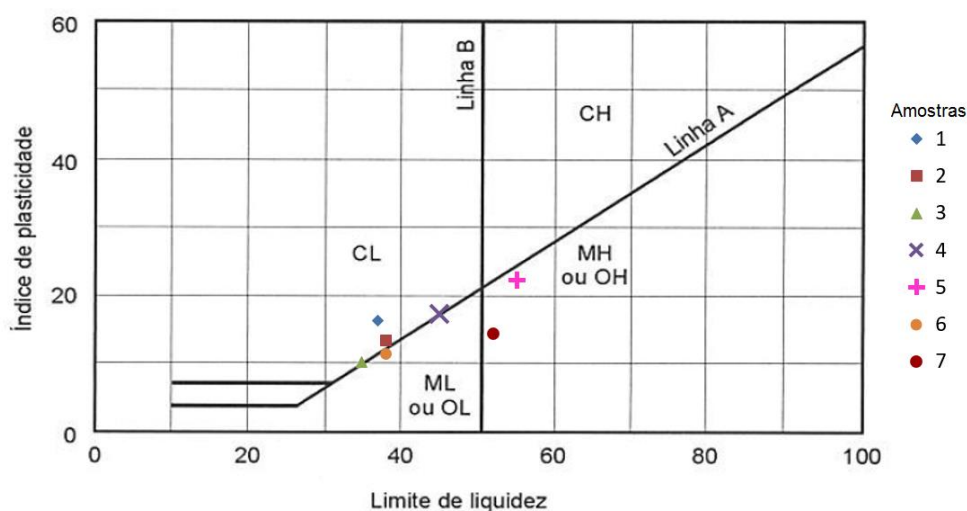


Fonte: Autora.

Como é possível observar, o limite de liquidez das amostras variou de 35% a 55% e o de limite de plasticidade de 10% a 22%. A umidade ótima média variou de 18,1% a 23,2% e a massa específica seca máxima varia de 13,7 a 16,7 kN/m<sup>3</sup>. A Tabela 6 apresenta um resumo com o resultado dos ensaios de caracterização do solo em questão: limites de Atterberg (LL e LP), massa específica dos sólidos e distribuição granulométrica.

A Figura 49 mostra a classificação dos solos na carta de plasticidade de Casagrande.

**Figura 49** – Classificação do solo na Carta de Plasticidade de Casagrande.



**Fonte:** Autora.

Observa-se que os solos 2, 3, 4 e 6 encontram-se sobre a linha A do gráfico, ou seja, estão entre o limite de serem classificados como CL (argilas inorgânicas de baixa plasticidade) e ML (siltes inorgânicos de baixa plasticidade). O solo 1 pode ser classificado como uma argila inorgânica de baixa plasticidade.

Já os solos 5 e 7 são classificados como MH (siltes inorgânicos de alta plasticidade), uma vez que apresentam o valor do limite de liquidez (LL) maior que 50%.

A partir de ensaios de difratometria RX, observou maior quantidade de muscovita, seguido de caulinita e quartzo.

**Tabela 6 - Resultado dos ensaios de caracterização do solo.**

Amostra	Litologia	Profundidade (m)	Análise granulométrica					Limites de Atterberg			Densidade dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )	Umidade natural (%)	$\gamma_{s,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	hótima (%)
			%					%						
			Argila	Silte	Areia			LL	LP	IP				
fina	média	grossa												
1	Filito/Metabásica	0,0 a 0,50	2	76	16	3	3	37	21	16	27,7	8,6	15,1	21,9
2	Filito	0,0 a 0,50	6	82	10	1	1	38	25	13	28,0	11,0	16,7	18,1
3	Filito	1,70 a 3,00	6	82	10	1	1	35	25	10	27,8	17,2	16,7	18,8
4	Ultramilonito	10,0	10	74	13	2	1	45	28	17	28,5	23,6	15,4	18,9
5	Metabásica	4,5	13	64	19	3	1	55	33	22	29,6	24,5	14,4	22,0
6	Ultramilonito	10,0	7	79	12	1	1	38	28	11	28,0	21,9	15,6	23,2
7	Granito pouco milonitizado	4,5	17	62	10	10	1	52	38	14	27,4	26,9	13,7	28,8

**Fonte:** Autora.

## 4.2 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

A Tabela 7 mostra os valores de umidade ótima ( $h_{ótima}$ ) e do peso específico seco máximo para cada amostra, obtido no ensaio de compactação com energia normal. Para a Amostra 1 não se dispunha da curva de Proctor utilizada para moldagem dos corpos de prova submetidos aos ensaios triaxiais UU. Por isso, com base nas folhas dos ensaios, foram inferidos os valores de  $h_{ótima}$  e  $\gamma_{s,max}$  utilizados pelo laboratorista.

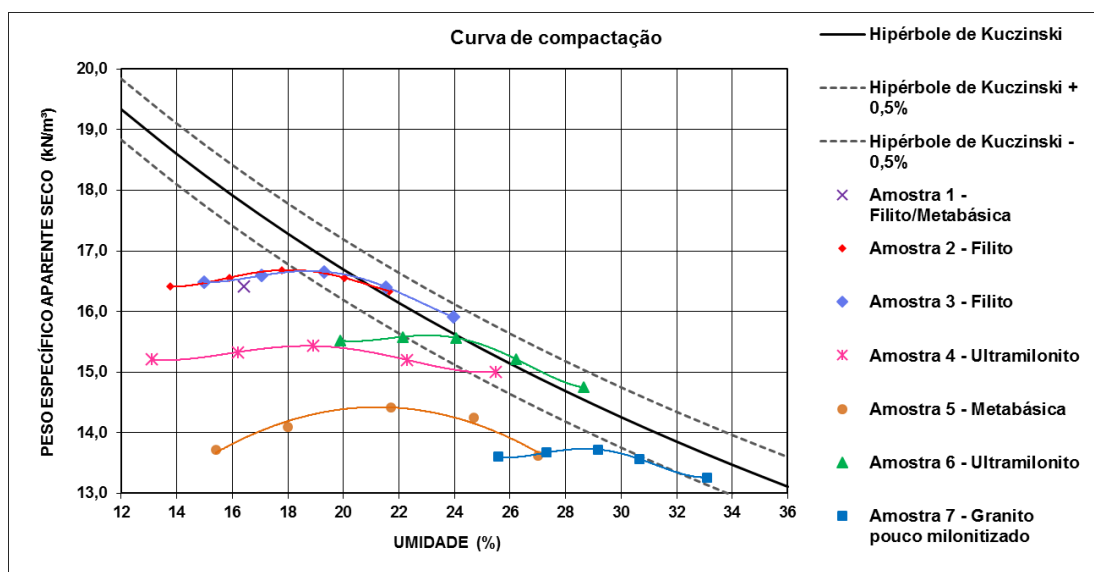
**Tabela 7** – Resultados do ensaio de compactação.

Amostra	Litologia	$h_{ótima}$ (%)	$\gamma_{s,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )
1	Filito/Metabásica	16,4(*)	16,4(*)
2	Filito	18,1	16,7
3	Filito	18,8	16,7
4	Ultramilonito	18,9	15,4
5	Metabásica	22,0	14,4
6	Ultramilonito	23,2	15,6
7	Granito pouco milonitizado	28,8	13,7

(\*) Valores usados na preparação dos corpos de prova para ensaios.

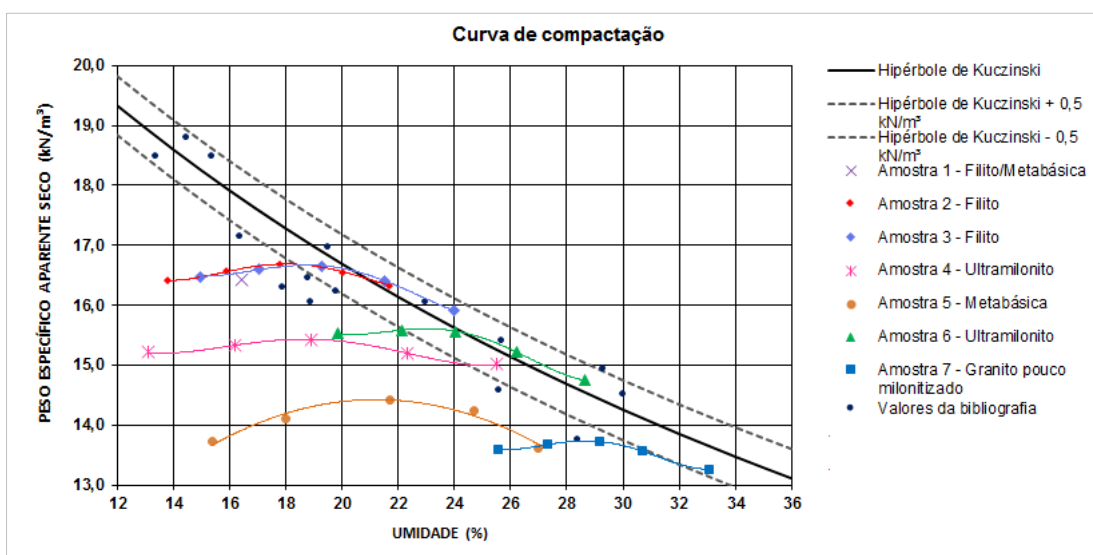
**Fonte:** Autora.

O gráfico da Figura 50 mostra um resumo dos ensaios de compactação. A hipérbole de Kuczinski também foi desenhada, juntamente com a variação de 0,5 kN/m<sup>3</sup>, para mais ou para menos. Como é possível observar, a maior parte dos ensaios realizados está com o valor de peso específico seco máximo dentro do limite da correlação estatística de Kuczinski. Apenas as amostras 4, 5 e 7 não estão dentro do limite. Segundo Cruz et al. (1982-1985), solos siltosos, como os solos em estudo, podem apresentar peso específico máximo menor que o obtido pela hipérbole de Kuczinski.

**Figura 50** – Resumo das curvas de compactação.

**Fonte:** Autora.

A Figura 51 mostra uma comparação entre os valores de teor de umidade ótima e peso específico máximo obtidos para os ensaios com as amostras 1 a 7 com os valores da bibliografia (Tabela 3). Como é possível observar, alguns valores da bibliografia também ficam fora do limite definido pela hipérbole de Kuczinski.

**Figura 51** – Resumo das curvas de compactação – valores obtidos através de ensaios com as amostras 1 a 7 e valores da bibliografia (Tabela 3).

**Fonte:** Autora.

### 4.3 ENSAIOS TRIAXIAIS CU E UU

#### 4.3.1 Parâmetros de resistência

As Tabela 8 e Tabela 9 mostram os valores dos parâmetros de resistência efetivos e totais, obtidos para corpos de prova de amostras compactadas na umidade ótima, 2% acima e 4% acima. Os ensaios triaxiais CU foram realizados com amostras saturadas, enquanto os ensaios UU com amostras não saturadas. Os valores foram calculados utilizando o conceito de trajetória de tensões, conforme item 2.3.2.

**Tabela 8 – Parâmetros de resistência, efetivos e totais, obtidos nos ensaios triaxiais UU não saturado – GC = 95%.**

Amostra	Litologia	hótima				hótima+2%				hótima+4%			
		c'	$\phi'$	c	$\phi$	c'	$\phi'$	c	$\phi$	c'	$\phi'$	c	$\phi$
		(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)
1	Filito/Metabásica	58	29	65	27	60	27	59	26	52	29	60	25
2	Filito	49	28	50	26	43	28	59	22	21	31	45	23
3	Filito	49	30	53	27	41	30	51	26	31	29	51	23
4	Ultramilonito	64	23	68	21	68	22	71	19	64	22	66	20
5	Metabásica	130	25	134	24	110	25	116	23	129	20	140	17
6	Ultramilonito	54	25	61	20	40	25	57	18	21	28	55	16
7	Granito pouco milonitizado	59	26	73	20	52	26	71	18	49	27	78	15

**Fonte:** Autora.

**Tabela 9 - Parâmetros de resistência, efetivos e totais, obtidos nos ensaios triaxiais CU saturado - GC = 95%.**

Amostra	Litologia	hótima				hótima+2%				hótima+4%			
		c'	$\phi'$	c	$\phi$	c'	$\phi'$	c	$\phi$	c'	$\phi'$	c	$\phi$
		(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)
2	Filito	-	-	-	-	18	31	81	17	18	32	74	20
3	Filito	14	35	75	20	14	34	75	21	21	34	81	21
6	Ultramilonito	17	31	62	17	17	29	48	18	21	29	64	16
7	Granito pouco milonitizado	18	34	57	18	26	32	67	16	17	34	63	18

**Fonte:** Autora.

Os valores obtidos foram comparados com os parâmetros de resistência ao cisalhamento apresentados por Cruz (1996), Cruz (1967) e Maiolino (1985), para solos residuais compactados de Gnaisse, Filito e de Quartzito-Xisto. Foram também comparados com solos residuais de filito de Soares (2012) e solos residuais de filito e metabásica de Dib (1985) e Maiolino (1985).

Estes parâmetros estão indicados na Tabela 10, que é uma condensação da Tabela 3 (apresentada na Revisão Bibliográfica). De maneira geral, observa-

se que os valores de coesão obtidos a partir de ensaios, considerando todas as litologias, tem grande variação: de 21 a 130 kPa para não saturados e de 14 a 26 kPa para solos saturados. Para os valores de coesão da bibliografia também observa-se grande variação: nas litologias listadas, a coesão para solos não saturados varia de 0 a 90 kPa, enquanto para solos saturados varia de 0 a 73 kPa. Assim, conclui-se que pode haver uma variação grande do valor da coesão para solos residuais compactados.

Observa-se que a Amostra 5 (metabásica) apresenta os maiores valores de coesão efetiva, da ordem de 130 kPa, enquanto as demais amostras variam de 21 a 68 kPa. Como será visto nas análises dos ensaios do adensamento edométrico, item 4.5, a tensão de pré-adensamento da metabásica é superior aos demais solos, fato que justificaria o maior valor de coesão efetiva, conforme apresentado no item 2.3.2 por Duncan et al. (2005).

Já os valores de ângulo de atrito obtidos nos ensaios são muito próximos aos valores da bibliografia para solos não saturados e solos saturados compactados, para tensões intermediárias.



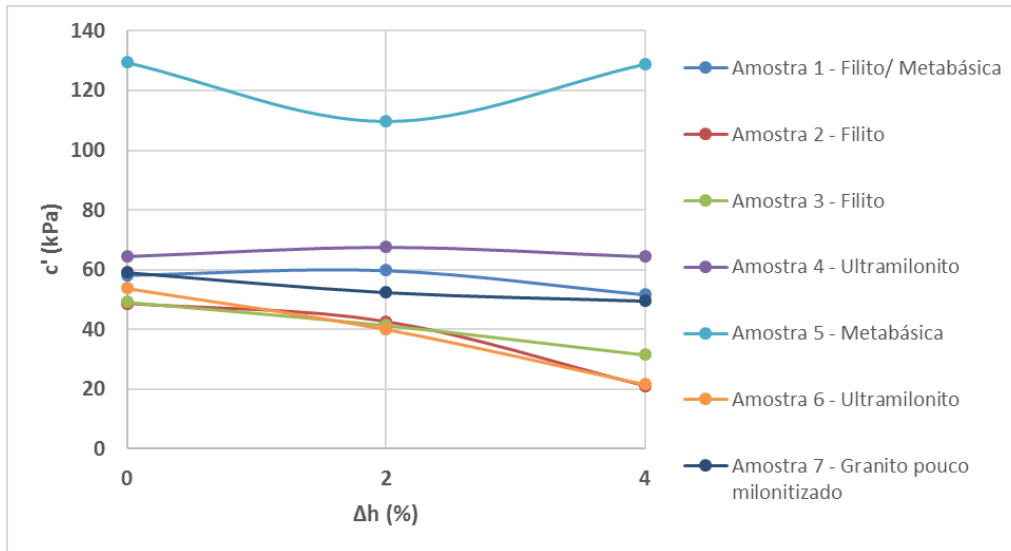
**Tabela 10** - Parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos residuais compactados.

Litologia	Não saturados		Saturados		Referência
	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	
Gnaiss	20 a 50	26 a 29	27	32	Cruz (1996)
Gnaiss - Barragem Euclides da Cunha (MT)	-	-	46	28,5	Maiolino (1985)
	-	-	53	31,5	Maiolino (1985)
	-	-	23	30,5	Maiolino (1985)
Gnaiss - Solo saprolítico - Chapéu D'uvas	-	-	-	-	Maiolino (1985)
	-	-	73	28	Maiolino (1985)
Gnaiss - Ponte Nova	18	30	-	-	Cruz (1967)
Granito - V. Galvão	10	28	-	-	Cruz (1967)
Quartzo- Xisto	15	33	-	-	Cruz (1996)
Granito	20 a 90	25 a 28,5	10 a 45	24,5 a 33	Cruz (1996)
Filito Aterro sanitário em Caieras (SP) - Ensaio de cisalhamento direto inundado	-	-	9,9	32,2	Soares (2012)
Filito - Barragem Manso (SP)	-	-	12	31,5	Maiolino (1985)
Filito - Juqueri A	18	31,5	-	-	Cruz (1967)
Filito - Juqueri C	5	30	-	-	Cruz (1967)
Filito E. O.	0	33	-	-	Cruz (1967)
Metassedimento - Solo residual maduro	-	-	25	26	Dib (1985b)
Metassedimento - Solo saprolítico	-	-	0	34	Dib (1985b)
Metassedimento - Tucuruí (AM)	-	-	28	28,5	Maiolino (1985)

**Fonte:** Adaptado de Cruz (1996), Maiolino (1985), Soares (2012) e Dib (1985) pela autora.

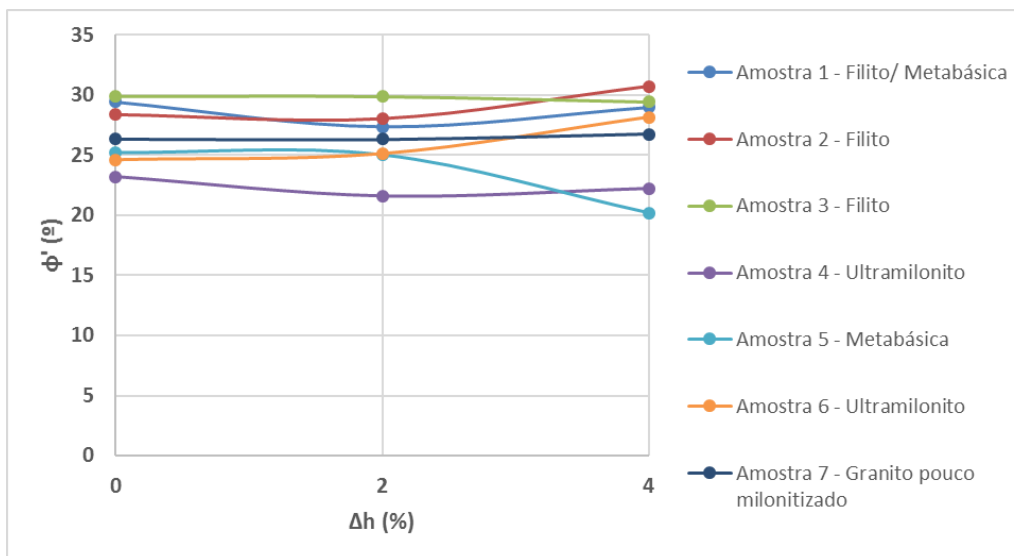
Os gráficos das Figura 52 a Figura 55 mostram a variação dos parâmetros efetivos de resistência ( $c'$  e  $\phi'$ ) com o desvio de umidade ( $\Delta h$ ), para os ensaios triaxiais UU não saturado e CU saturado.

**Figura 52** – Gráfico coesão efetiva ( $c'$ ) em função do desvio de umidade ( $\Delta h$ ) para ensaios triaxiais UU não saturado.



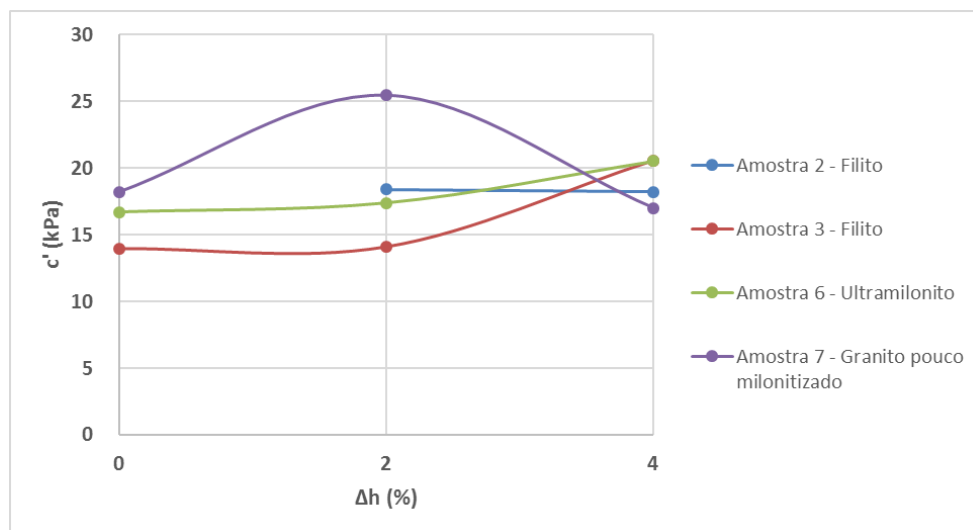
Fonte: Autora.

**Figura 53** – Gráfico ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ) em função do desvio de umidade ( $\Delta h$ ) para ensaios triaxiais UU não saturado.



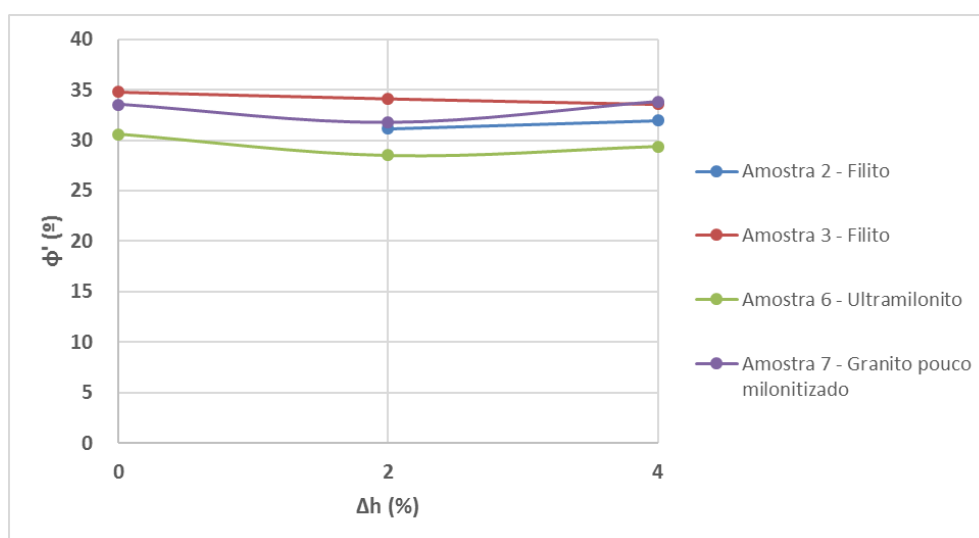
Fonte: Autora.

**Figura 54** – Gráfico coesão efetiva ( $c'$ ) em função do desvio de umidade ( $\Delta h$ ) para ensaios triaxiais CU saturado.



**Fonte:** Autora.

**Figura 55** – Gráfico ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ) em função do desvio de umidade ( $\Delta h$ ) para ensaios triaxiais CU saturado.



**Fonte:** Autora.

Conforme visto no item 2.2.7 e na Figura 27, a resistência em termos de tensões efetivas é função da densidade seca (ou do grau de compactação) e varia pouco com a umidade (ou o desvio de umidade em relação à ótima). No presente estudo, o grau de compactação dos corpos de prova girou em torno de 95%. Ademais, conforme visto nas Figura 53 e Figura 55, os valores de ângulo de atrito praticamente não sofrem variação com o aumento do desvio de umidade

em relação à ótima. Assim, foram determinadas as coesões considerando os valores dos ângulos de atrito efetivos constantes e iguais à média dos ângulos de atrito para os três desvios de umidade em relação à ótima (0%, 2% e 4%). Os valores dos ângulos de atrito efetivos fixados para cada litologia e cada tipo de ensaio triaxial estão apresentados nas Tabela 11 e Tabela 12.

**Tabela 11** – Valores de coesão efetiva calculados a partir de um valor fixo de ângulo de atrito efetivo, para ensaio UU não saturado.

Amostra	Litologia	c' (kPa)			$\phi'$ fixo (°)	c' médio (kPa)	$\sigma_{c'}$ (kPa)
		$\Delta h$					
		hótima	hótima+2%	hótima+4%			
1	Filito/Metabásica	64	52	54	29	57	6,3
2	Filito	44	37	37	29	39	4,3
3	Filito	50	42	30	30	41	10,2
4	Ultramilonito	69	63	64	22	66	3,4
5	Metabásica	143	121	107	24	124	18,1
6	Ultramilonito	47	36	31	26	38	8,0
7	Granito pouco milonitizado	61	54	53	26	56	4,6

onde  $\sigma_{c'}$ : desvio padrão da coesão efetiva.

**Fonte:** Autora.

**Tabela 12** – Valores de coesão efetiva calculados a partir de um valor fixo de ângulo de atrito efetivo, para ensaio CU saturado.

Amostra	Litologia	c' (kPa)			$\phi'$ fixo (°)	c' médio (kPa)	$\sigma_{c'}$ (kPa)
		$\Delta h$					
		hótima	hótima+2%	hótima+4%			
2	Filito		16	21	32	18	3,0
3	Filito	17	14	17	34	16	1,9
6	Ultramilonito	22	13	20	29	18	4,8
7	Granito pouco milonitizado	20	20	21	33	20	0,4

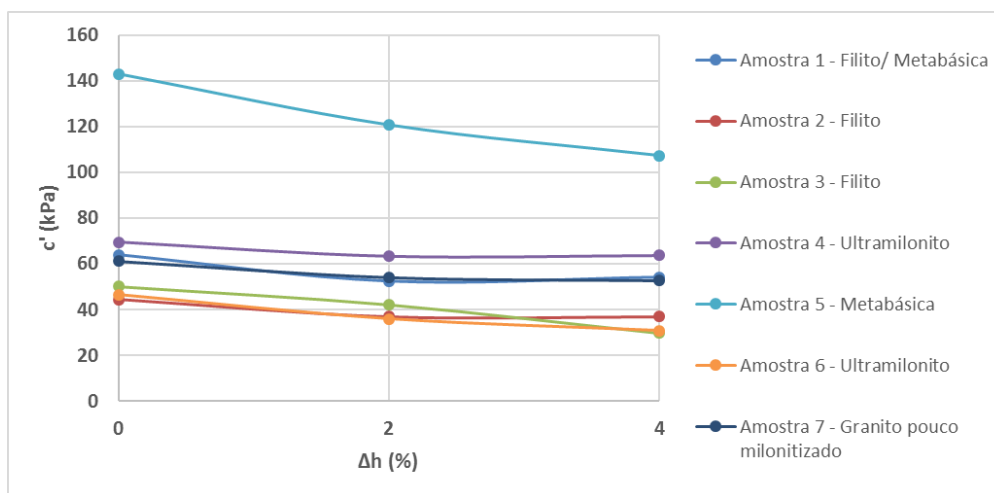
onde  $\sigma_{c'}$ : desvio padrão da coesão efetiva.

**Fonte:** Autora.

Os gráficos das Figura 56 e Figura 57 mostram a variação da coesão efetiva ( $c'$ ) com o desvio de umidade ( $\Delta h$ ), mantendo o ângulo de atrito efetivo fixo, para os ensaios triaxiais UU não saturado e CU saturado. Observa-se que no ensaio UU o valor da coesão efetiva manteve-se praticamente constante para todas as amostras, exceto para a amostra 5 (metabásica). No ensaio CU a maior

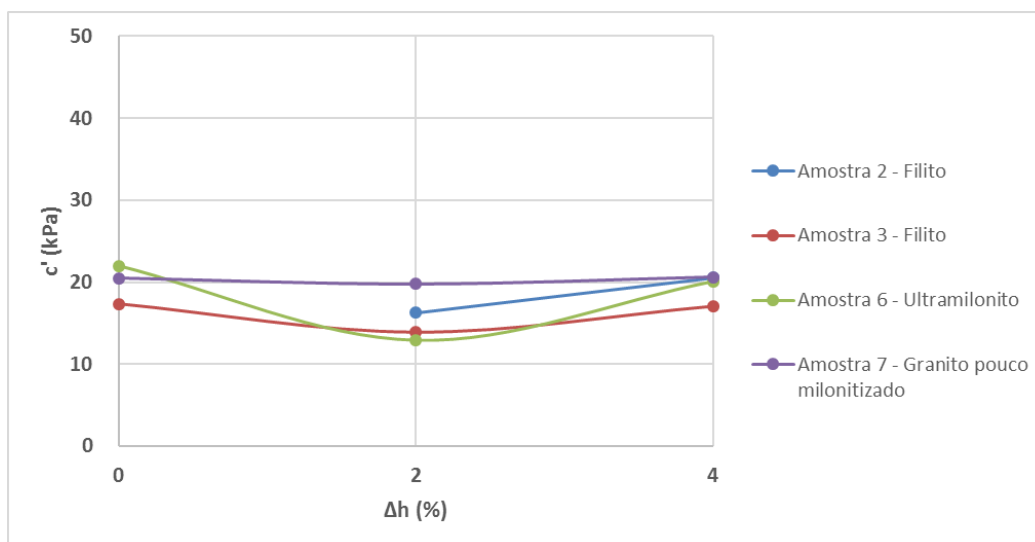
variação de coesão efetiva foi da amostra 6 (ultramilonito), seguido do filito (amostra 2). Confirma-se, assim, que a resistência em termos de tensão efetiva depende basicamente da densidade obtida, e não do teor de umidade no qual o solo se encontra.

**Figura 56** – Gráfico coesão efetiva ( $c'$ ) em função do desvio de umidade ( $\Delta h$ ) para ensaios triaxiais UU não saturado, com  $\varphi'$  fixo.



**Fonte:** Autora.

**Figura 57** – Gráfico coesão efetiva ( $c'$ ) em função do desvio de umidade ( $\Delta h$ ) para ensaios triaxiais CU saturado, com  $\varphi'$  fixo.



**Fonte:** Autora.

Estes solos se encaixam no grupo II de Cruz (1996), descrito no item 2.3.3 acima, isto é, são solos saprolíticos do Pré Cambriano, sendo mais siltosos.

Observando os gráficos de trajetória de tensões e de tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) versus deformação (Apêndices C e D) de cada ensaio, pode-se comparar com os tipos de comportamentos de solos definidos por Cruz (1996), conforme Figura 28 a Figura 30. Observa-se que as trajetórias de tensões dos ensaios CU são mais próximas das trajetórias de tensões dos solos de comportamento do tipo I de Cruz (1996), por se tratarem de ensaios drenados. Já as trajetórias dos ensaios UU se aproximam mais as trajetórias dos solos de comportamento do tipo II.

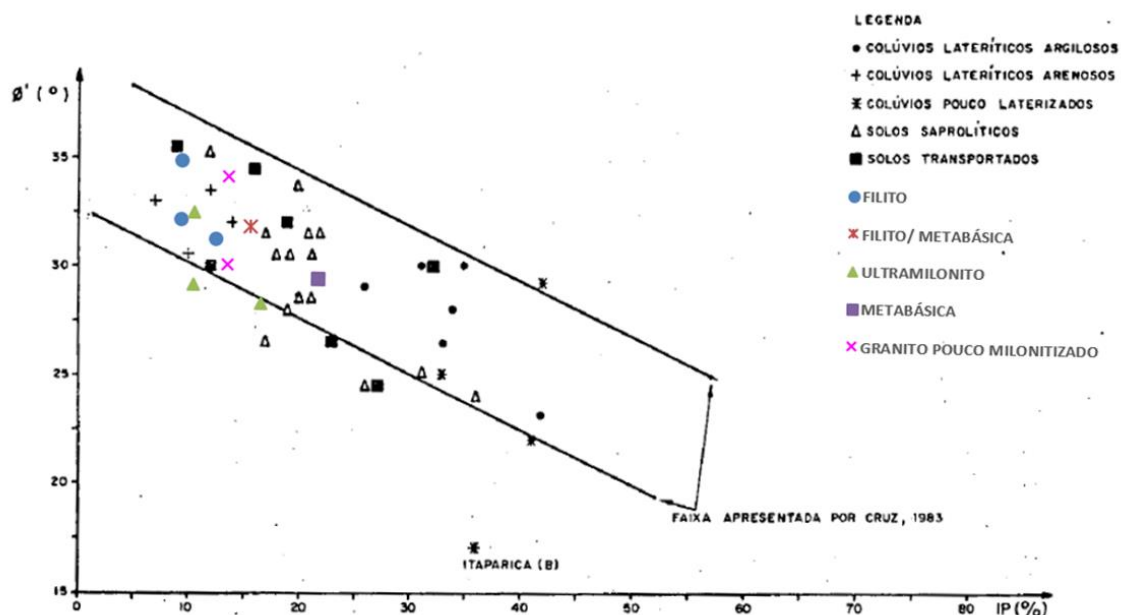
Com relação às curvas de  $\sigma_d$  em função de  $\varepsilon$ , observa-se que os solos estudados têm comportamento do tipo II, devido à mobilização lenta da resistência, com deformações de ruptura elevadas e mobilização da pressão neutra gradual. Como visto no item 2.3.3, é um comportamento típico de solos compactados no entorno e acima da umidade ótima.

As curvas  $u$  em função de  $\varepsilon$ , em geral, também apresentam comportamento do tipo II, exceto para algumas tensões de confinamento, geralmente as mais baixas (50, 100 e 200 kPa), que apresentam comportamento do tipo III. Conforme apresentado por Cruz (1996) esse é um comportamento típico de solos compactados saturados quando rompidos com tensões de câmara baixa (50 a 200 kPa). A trajetória de tensões praticamente tangencia a envoltória de resistência em alguns pontos.

A seguir, foram elaboradas algumas correlações entre: a) o ângulo de atrito efetivo,  $\phi'$ , e o índice de plasticidade, IP; b) a coesão efetiva,  $c'$ , e a porcentagem de argila. Estas correlações foram comparadas com as correlações obtidas por Cruz (1983) e Maiolino (1985).

A Figura 58 mostra os valores de  $\phi'$  em função de IP obtidos para as amostras comparados com os valores da bibliografia, obtidos por Maiolino (1985). Foram considerados os valores de ângulo de atrito efetivo obtidos para os ensaios na condição de umidade ótima ( $h_{ótima}$ ) dos ensaios CU e UU, separados por litologia. Como é possível observar, os valores obtidos através de ensaios encontram-se mais próximos do limite inferior da faixa definida por Maiolino.

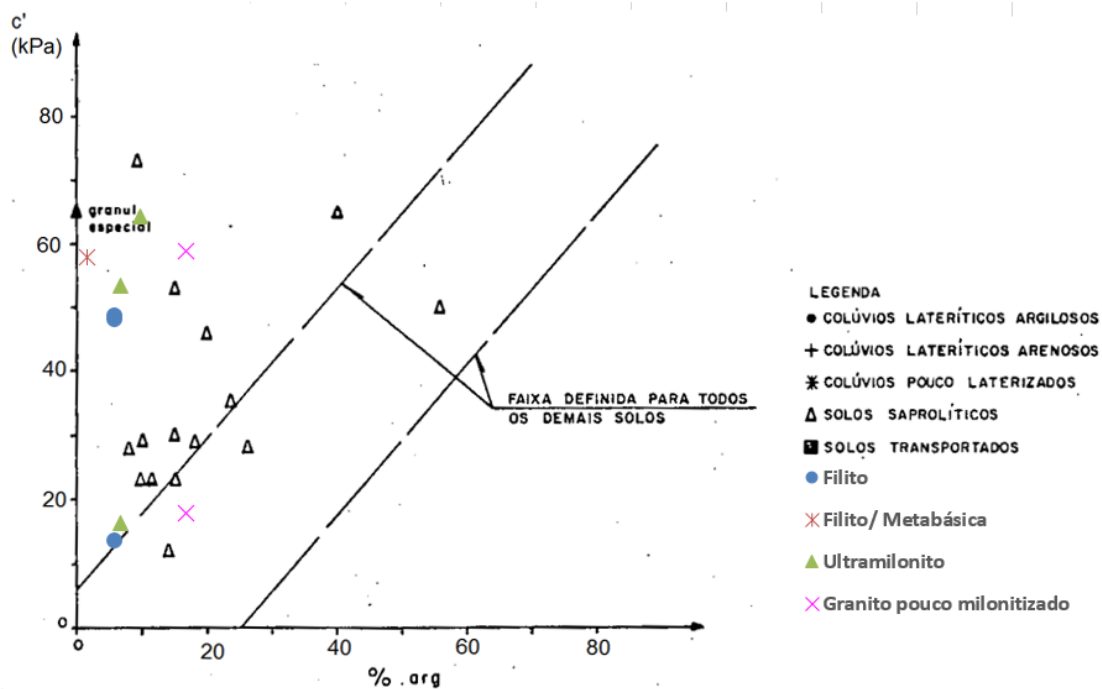
**Figura 58** – Gráfico  $\phi'$  em função de IP, comparando com valores da bibliografia.



**Fonte:** Adaptado de Maiolino (1985) pela autora.

A Figura 59 mostra os valores de  $c'$  em função do percentual de argila obtidos para as amostras através de ensaios CU e UU, separados por litologia, na condição de umidade ótima ( $h_{ótima}$ ), comparados com os valores da bibliografia, obtidos por Cruz (1983). Como é possível observar, os valores obtidos através de ensaios encontram-se à esquerda da faixa de valores definida por Cruz (1982-1985). Este é um comportamento esperado, uma vez que os solos em estudo são solos residuais saprolíticos. Os valores referentes à metabásica não foram apresentados no gráfico, uma vez que o valor da coesão efetiva foi muito superior aos demais.

**Figura 59** – Gráfico  $c'$  em função do percentual de argila.



**Fonte:** Adaptado de Cruz (1982-1985) pela autora.

#### 4.3.2 Módulo de deformabilidade

A determinação do parâmetro de deformabilidade é essencial na estimativa de recalques na fase operacional dos aterros rodoviários, uma vez que o estado limite de serviço pode ser alcançado antes do estado limite último (ruptura).

##### 4.3.2.1 Ensaios triaxiais UU não saturado

As Tabela 13 a Tabela 15 apresentam os valores de módulo de deformabilidade secante, passando pela origem e pelo valor de 50% da tensão na ruptura, através de ensaios triaxiais UU para todos os desvios de umidade em relação à umidade ótima ( $\Delta h$ ).



**Tabela 13 – Módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  -  $h_{ótima}$  – Ensaios triaxiais UU não saturado.**

Amostra	Litologia	$E_{50}$ (kPa)			
		$\sigma_3 = 50$ kPa	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 200$ kPa	$\sigma_3 = 400$ kPa
1	Filito/Metabásica	13.357	17.575	26.575	32.910
2	Filito	11.922	18.755	23.089	27.986
3	Filito	11.678	17.381	22.993	32.689
4	Ultramilonito	11.479	16.332	17.104	20.771
5	Metabásica	18.907	26.783	28.088	31.841
6	Ultramilonito	9.932	13.560	16.699	22.758
7	Granito pouco milonitizado	8.002	12.080	14.766	20.019

**Fonte:** Autora.

**Tabela 14 - Módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  -  $h_{ótima} + 2\%$  – Ensaios triaxiais UU não saturado.**

Amostra	Litologia	$E_{50}$ (kPa)			
		$\sigma_3 = 50$ kPa	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 200$ kPa	$\sigma_3 = 400$ kPa
1	Filito/Metabásica	12.327	18.029	20.142	31.884
2	Filito	13.532	14.895	22.105	26.768
3	Filito	14.835	17.765	23.082	29.832
4	Ultramilonito	11.179	15.428	18.319	20.643
5	Metabásica	20.618	20.145	24.984	26.613
6	Ultramilonito	8.763	12.038	17.129	19.104
7	Granito pouco milonitizado	7.386	9.922	15.182	18.912

**Fonte:** Autora.

**Tabela 15 - Módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  -  $h_{ótima} + 4\%$  – Ensaios triaxiais UU não saturado.**

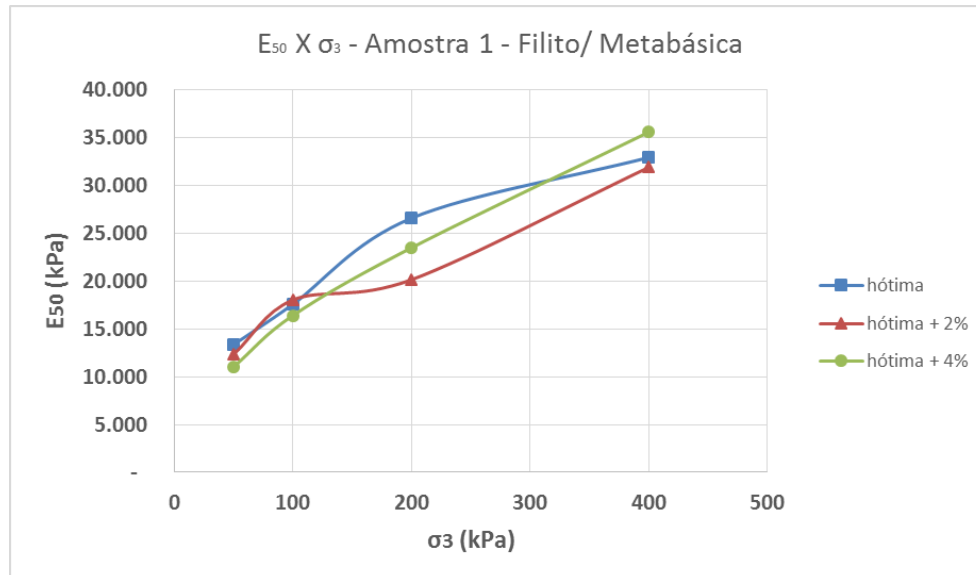
Amostra	Litologia	$E_{50}$ (kPa)			
		$\sigma_3 = 50$ kPa	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 200$ kPa	$\sigma_3 = 400$ kPa
1	Filito/Metabásica	11.027	16.395	23.479	35.568
2	Filito	9.774	14.036	19.835	28.950
3	Filito	10.325	14.559	17.555	24.954
4	Ultramilonito	11.176	13.171	16.588	19.915
5	Metabásica	19.587	20.901	26.319	27.862
6	Ultramilonito	6.564	9.151	13.762	19.261
7	Granito pouco milonitizado	7.689	9.567	12.517	20.006

**Fonte:** Autora.

As Figura 60 a Figura 66 mostram gráficos do módulo de deformabilidade secante a 50% da tensão de ruptura em função da tensão de confinamento,  $\sigma_3$ ,

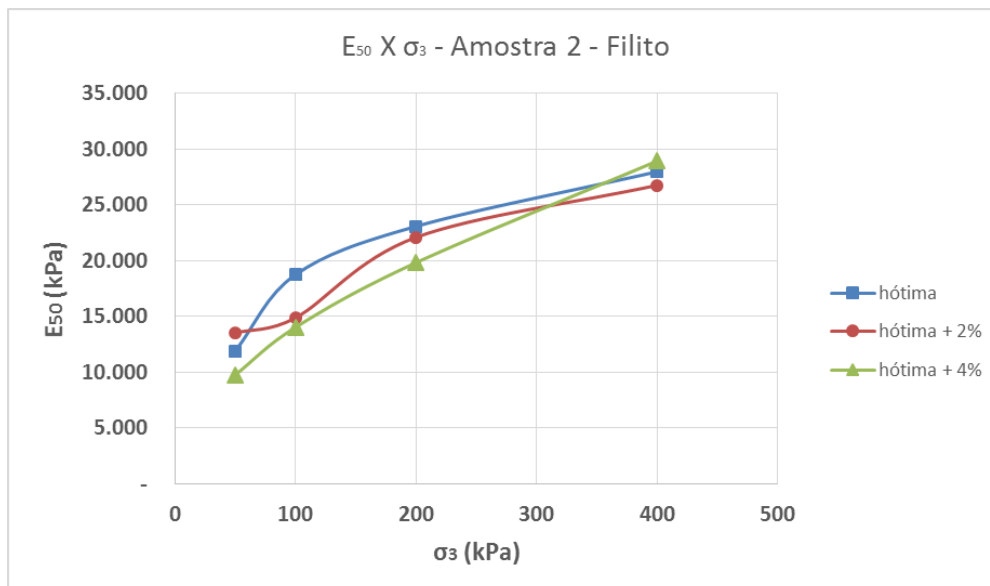
para cada amostra, variando o desvio de umidade, para os ensaios triaxiais UU não saturados.

**Figura 60** – Módulo de deformabilidade  $E_{50}$  versus  $\sigma_3$  – Amostra 1 – Filito/ Metabásica – Ensaio triaxial UU não saturado.



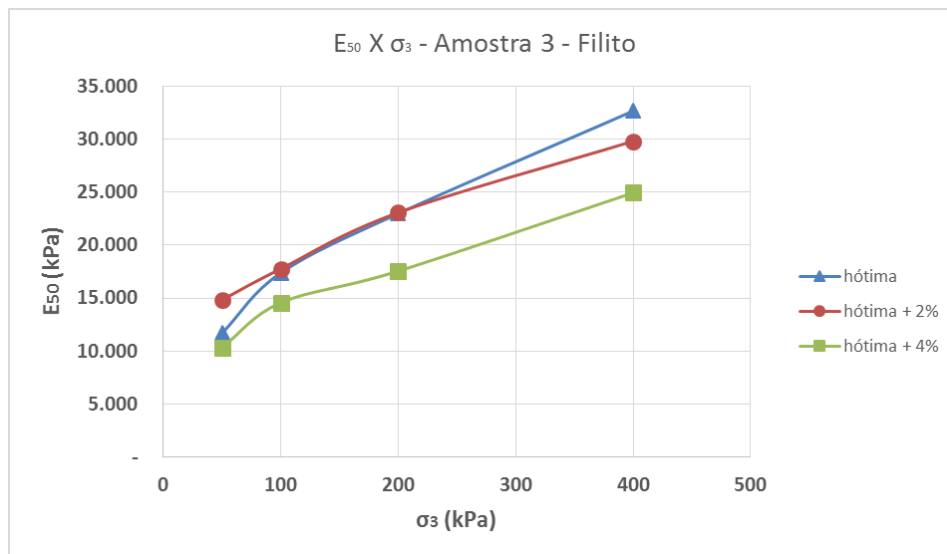
Fonte: Autora.

**Figura 61** – Módulo de deformabilidade  $E_{50}$  versus  $\sigma_3$  – Amostra 2 – Filito – Ensaio triaxial UU não saturado.



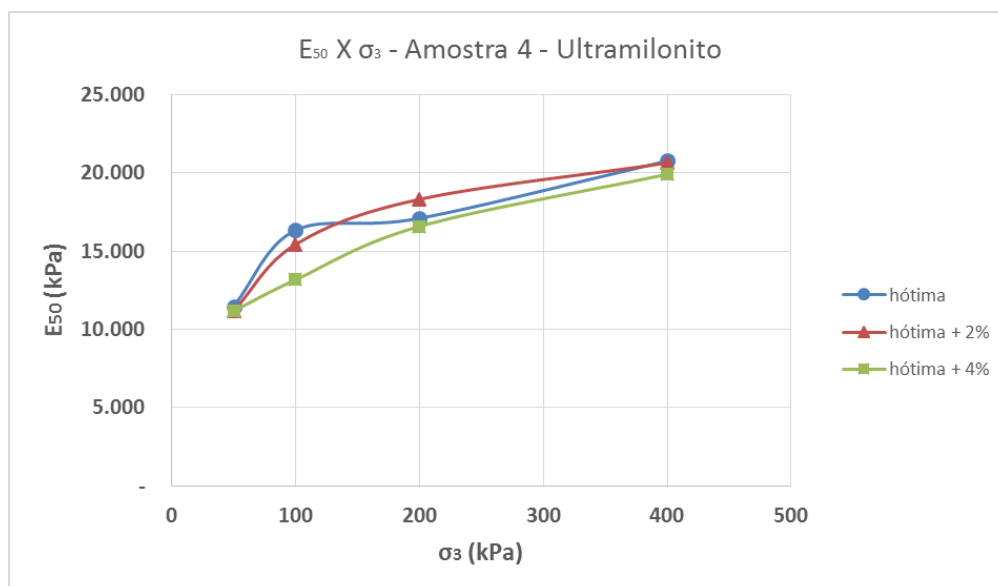
Fonte: Autora.

**Figura 62** – Módulo de deformabilidade  $E_{50}$  versus  $\sigma_3$  – Amostra 3 – Filito  
- Ensaio triaxial UU não saturado.



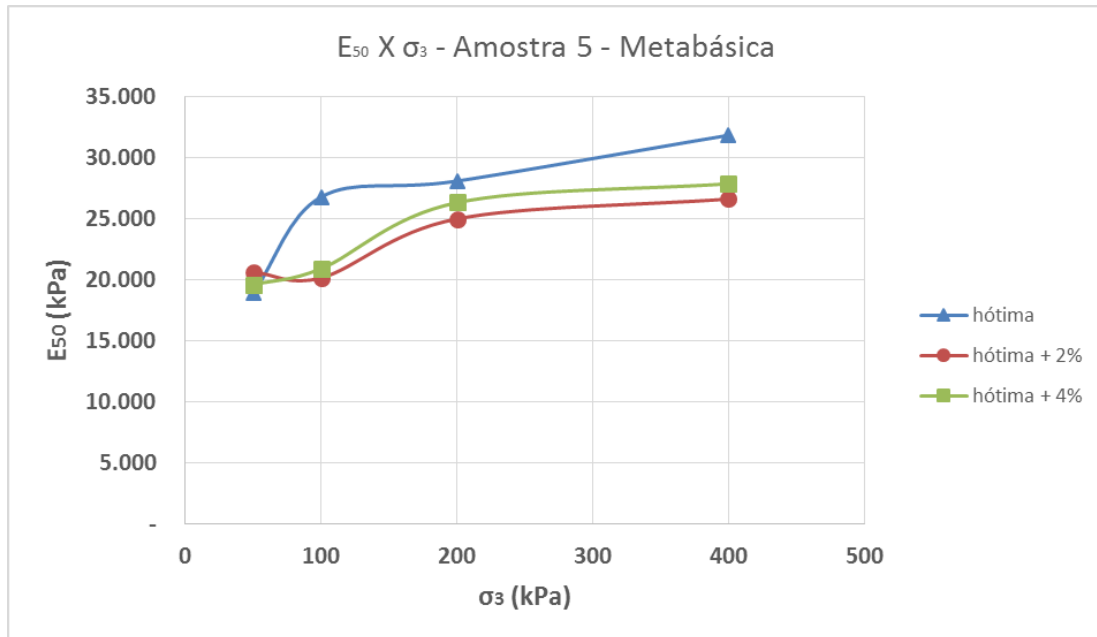
Fonte: Autora.

**Figura 63** – Módulo de deformabilidade  $E_{50}$  versus  $\sigma_3$  – Amostra 4 – Ultramilonito – Ensaio triaxial UU não saturado.



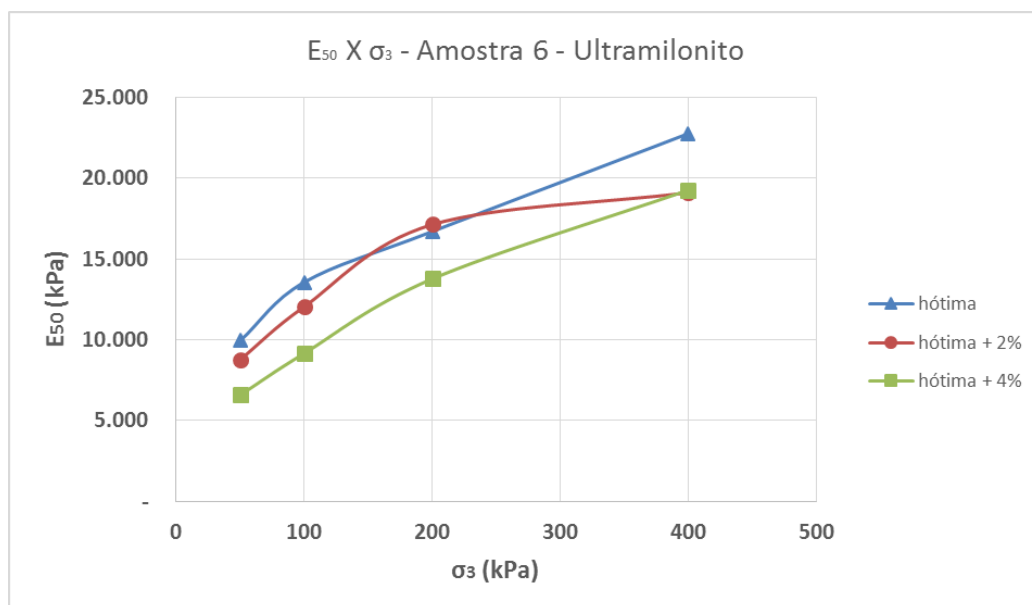
Fonte: Autora.

**Figura 64** – Módulo de deformabilidade  $E_{50}$  versus  $\sigma_3$  – Amostra 5 – Metabásica – Ensaio triaxial UU não saturado.



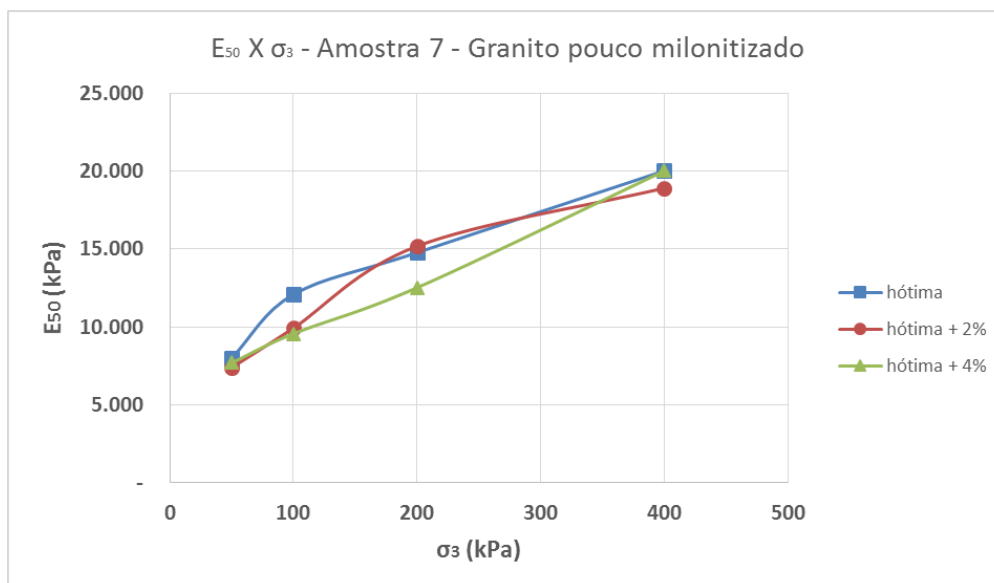
**Fonte:** Autora.

**Figura 65** – Módulo de deformabilidade  $E_{50}$  versus  $\sigma_3$  – Amostra 6 – Ultramilonito – Ensaio triaxial UU não saturado.



**Fonte:** Autora.

**Figura 66** – Módulo de deformabilidade  $E_{50}$  versus  $\sigma_3$  – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado – Ensaio triaxial UU não saturado.



**Fonte:** Autora.

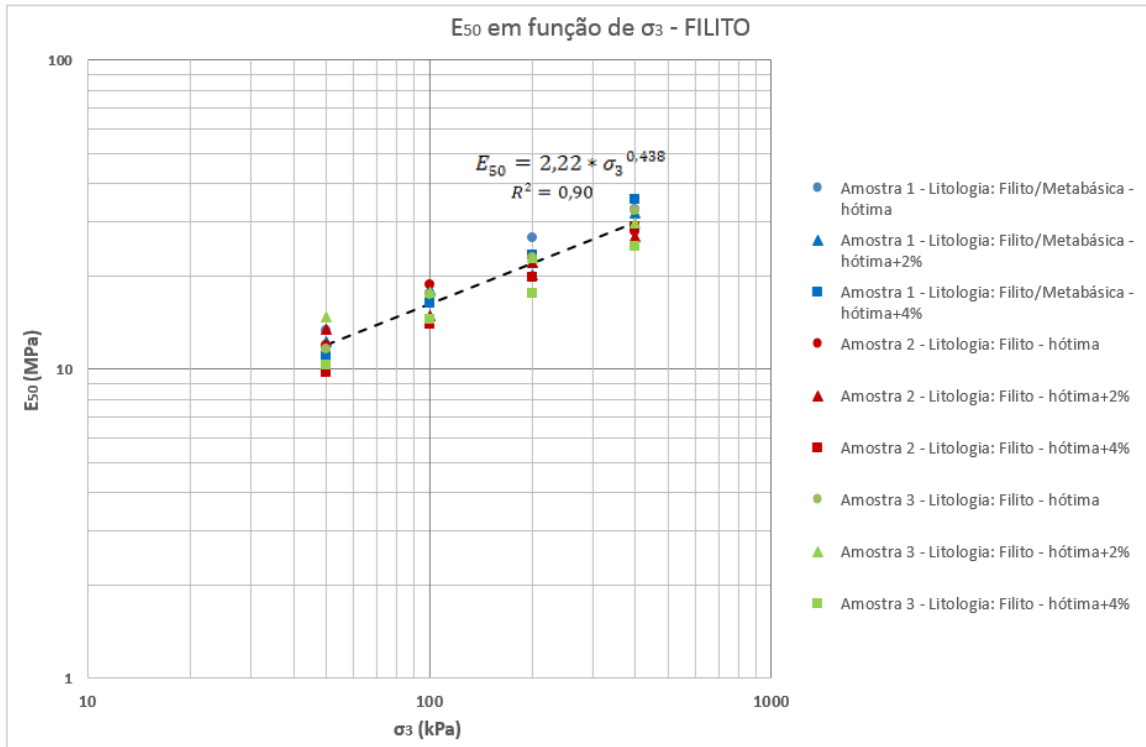
Para os ensaios triaxiais UU não saturado os maiores valores de  $E_{50}$  foram para a amostra 5 (metabásica), e os menores para a amostra 7 (granito pouco milonitizado).

A seguir, foi analisado o módulo de deformabilidade ( $E_{50}$ ) em função da tensão confinante ( $\sigma_3$ ), separados por litologia, para o ensaio triaxial UU não saturado. Foram obtidas correlações também separadas por litologia. A correlação obtida segue o formato:

$$E_{50} = a * \sigma_3^n \quad (32)$$

As Figura 67 a Figura 70 mostram as correlações obtidas para os ensaios triaxiais UU não saturado.

**Figura 67** – Módulo de deformabilidade em função da tensão confinante para amostras 1, 2 e 3 – Filito – Ensaio triaxial UU não saturado.



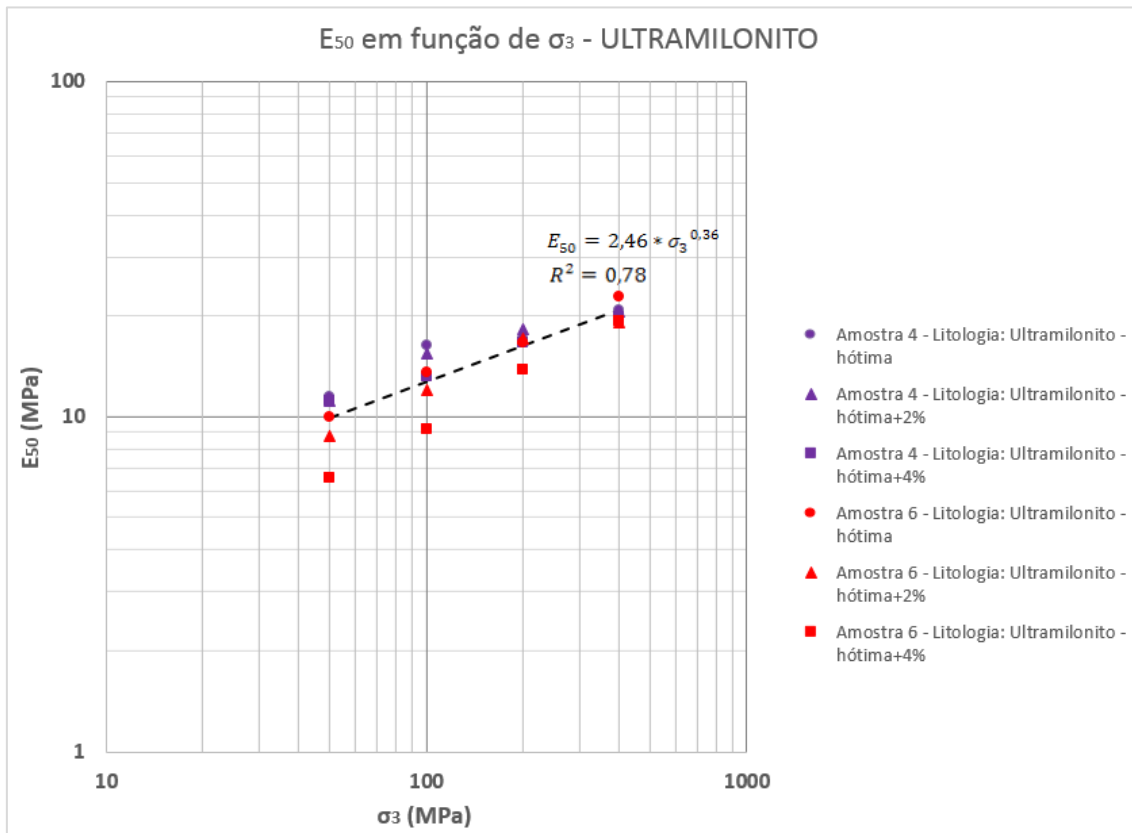
**Fonte:** Autora.

Assim, para as amostras 1, 2 e 3 de filito, obtém-se:

$$E_{50} = 2,22 * \sigma_3^{0,438}; R^2 = 0,90 \quad (33)$$

onde  $\sigma_3$  está em kPa e  $E_{50}$ , em MPa.

**Figura 68** – Módulo de deformabilidade em função da tensão confinante para amostras 4 e 6 – Ultramilonito – Ensaio triaxial UU não saturado.



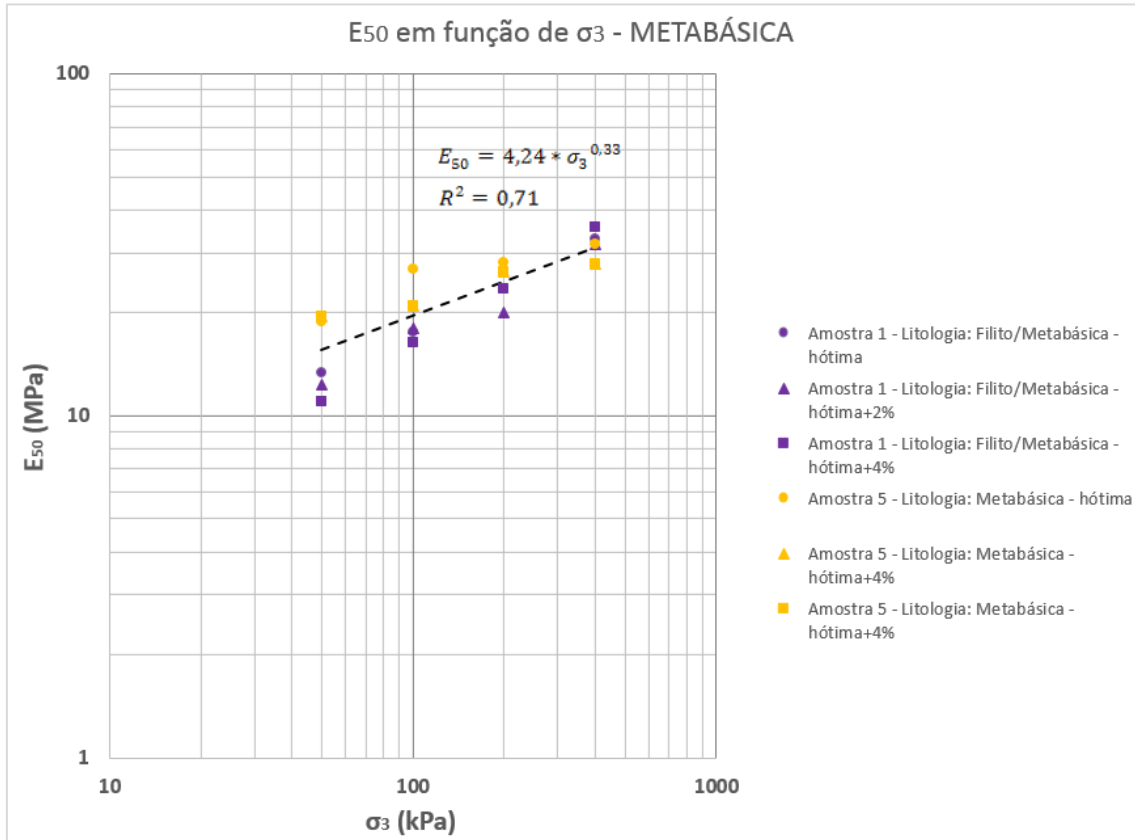
**Fonte:** Autora.

Assim, para as amostras 4 e 6 de ultramilonito, obtém-se, com relativamente grande dispersão:

$$E_{50} = 2,46 * \sigma_3^{0,36}; R^2 = 0,78 \quad (34)$$

onde  $\sigma_3$  está em kPa e  $E_{50}$ , em MPa.

**Figura 69** – Módulo de deformabilidade em função da tensão confinante para amostras 1 e 5 – Metabásica – Ensaio triaxial UU não saturado.



**Fonte:** Autora.

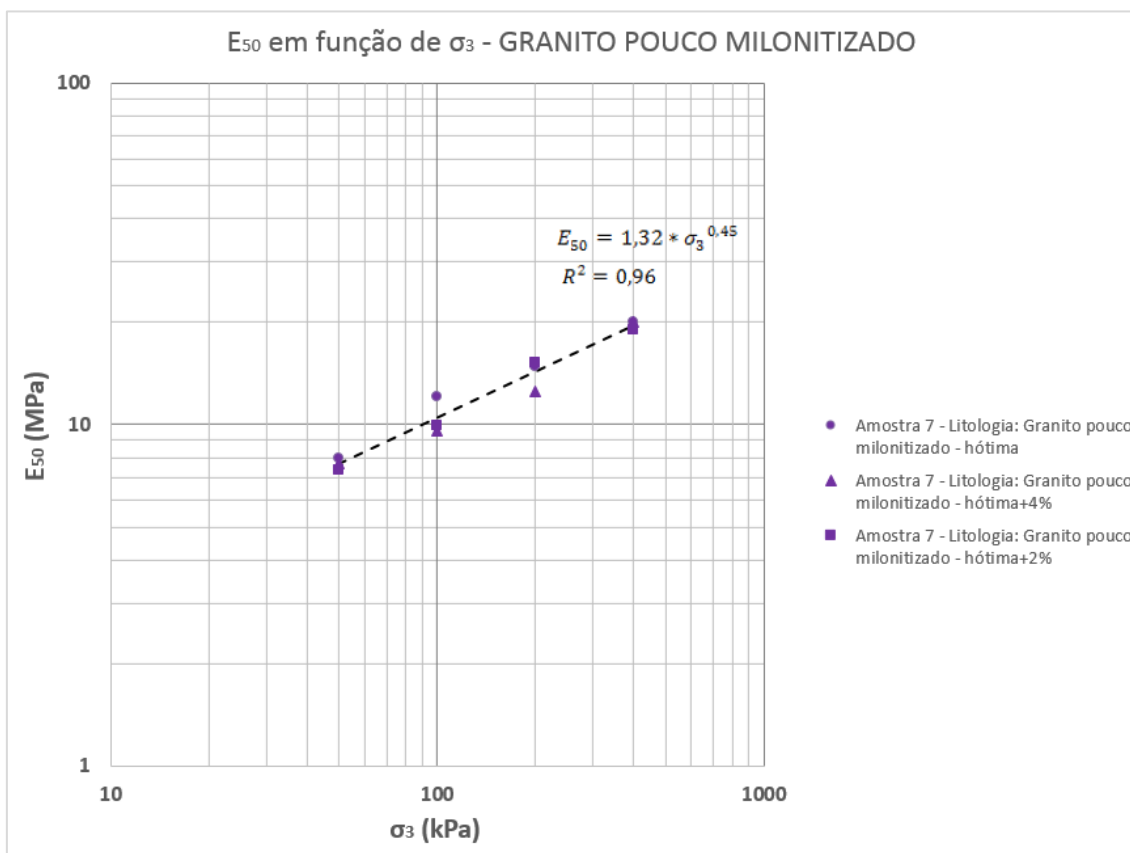
Assim, também para as amostras 1 e 5 de metabásica, obtém-se, com relativamente grande dispersão:

$$E_{50} = 4,24 * \sigma_3^{0,33}; R^2 = 0,71 \quad (35)$$

onde  $\sigma_3$  está em kPa e  $E_{50}$ , em MPa.



**Figura 70** – Módulo de deformabilidade em função da tensão confinante para amostra 7 – Granito pouco milonitizado – Ensaio triaxial UU não saturado.



**Fonte:** Autora.

Assim, para a amostra 7 de granito pouco milonitizado, obtém-se:

$$E_{50} = 1,32 * \sigma_3^{0,45}; R^2 = 0,96 \quad (36)$$

onde  $\sigma_3$  está em kPa e  $E_{50}$ , em MPa.

A Tabela 16 mostra os valores do coeficiente “a” e “n” obtidos para a correlação 32 para os ensaios triaxiais UU não saturado. Vê-se que a dispersão nos valores de “a” é muito grande.

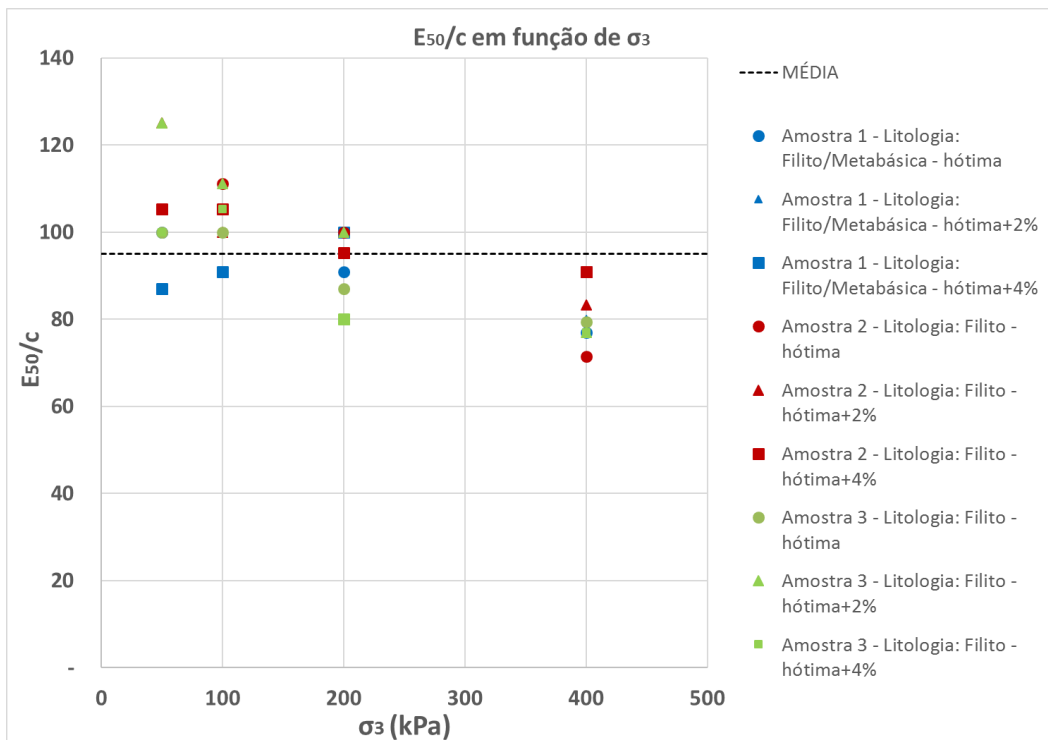
**Tabela 16** – Resumo dos coeficientes para ensaio triaxial UU não saturado.

	<b>a</b>	<b>n</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Filito	2,17	0,44	0,90
Ultramilonito	2,46	0,36	0,78
Metabásica	4,24	0,33	0,71
Granito pouco milonitizado	1,32	0,45	0,96

**Fonte:** Autora.

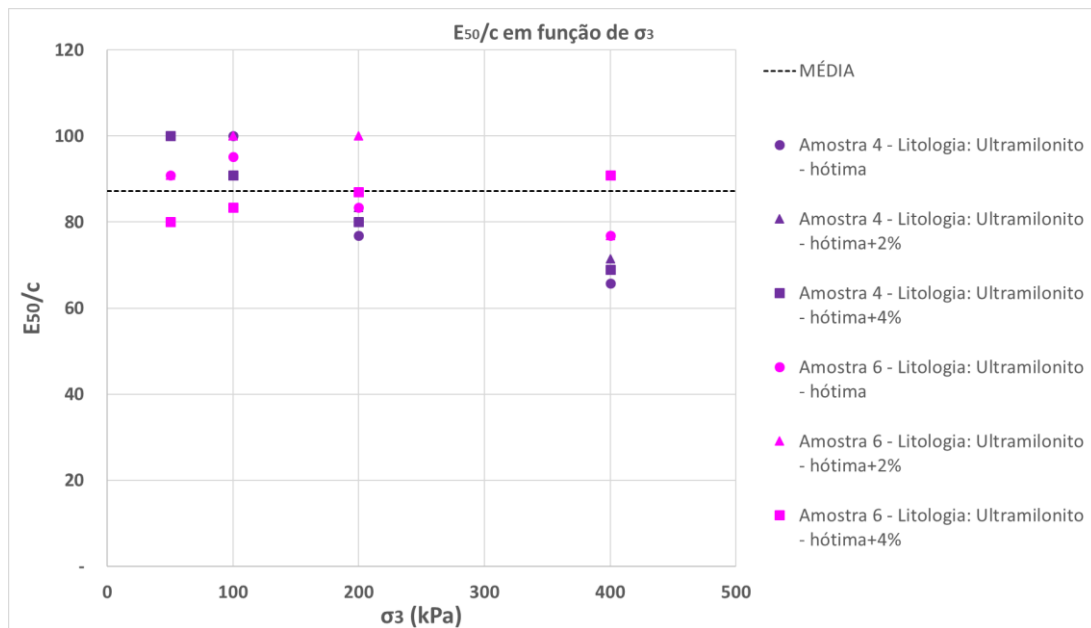
Além disso, foi observado que a razão entre o módulo  $E_{50}$  obtidos nos ensaios triaxiais UU não drenado e a resistência drenada do solo ( $c=0,5*(\sigma_1 - \sigma_3)$ ) é praticamente constante para todos os ensaios, quando separados por litologia. O gráfico das Figura 71 a Figura 74 mostram esses valores. Observa-se que os menores valores de  $E_{50}/c$  obtidos foram para o granito pouco milonitizado, sendo a média dos valores da ordem de 71. Já para as demais amostras, a média encontrada foi de 95 para o filito, 88 para o ultramilonito e 87 para a metabásica. A Tabela 17 apresenta estes valores, que variam na faixa de 71 a 95, com média global, envolvendo todas as litologias, de 85.

**Figura 71** –  $E_{50}/c$  em função de  $\sigma_3$  para Filito – Ensaio triaxial UU não saturado.



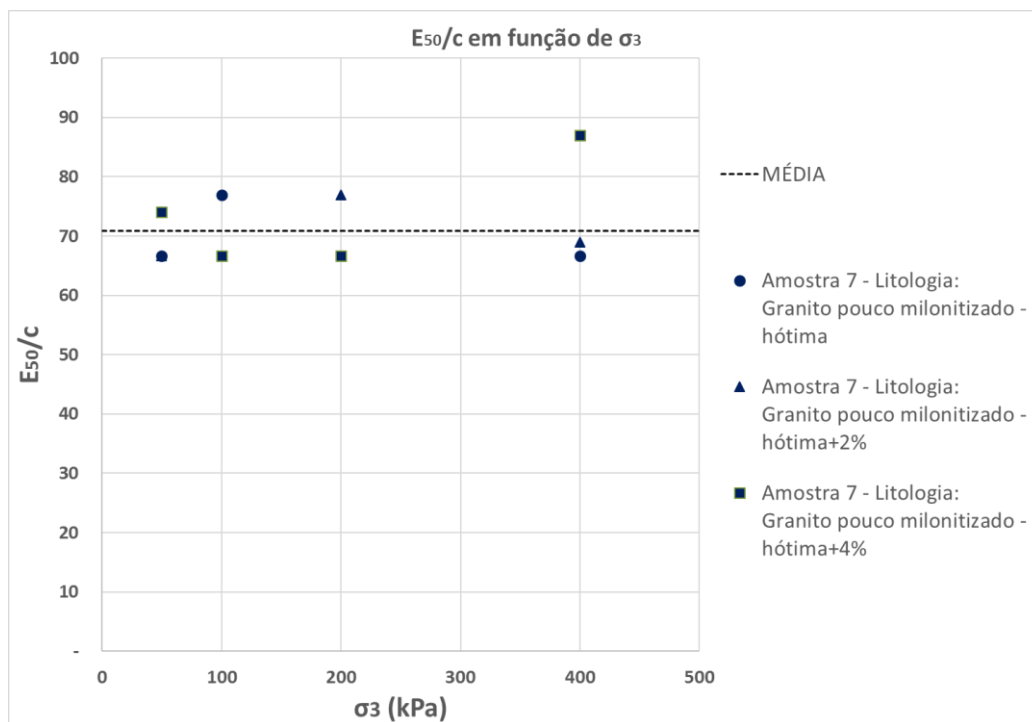
**Fonte:** Autora.

**Figura 72 –  $E_{50}/c$  em função de  $\sigma_3$  para Ultramilonito – Ensaio triaxial UU não saturado.**



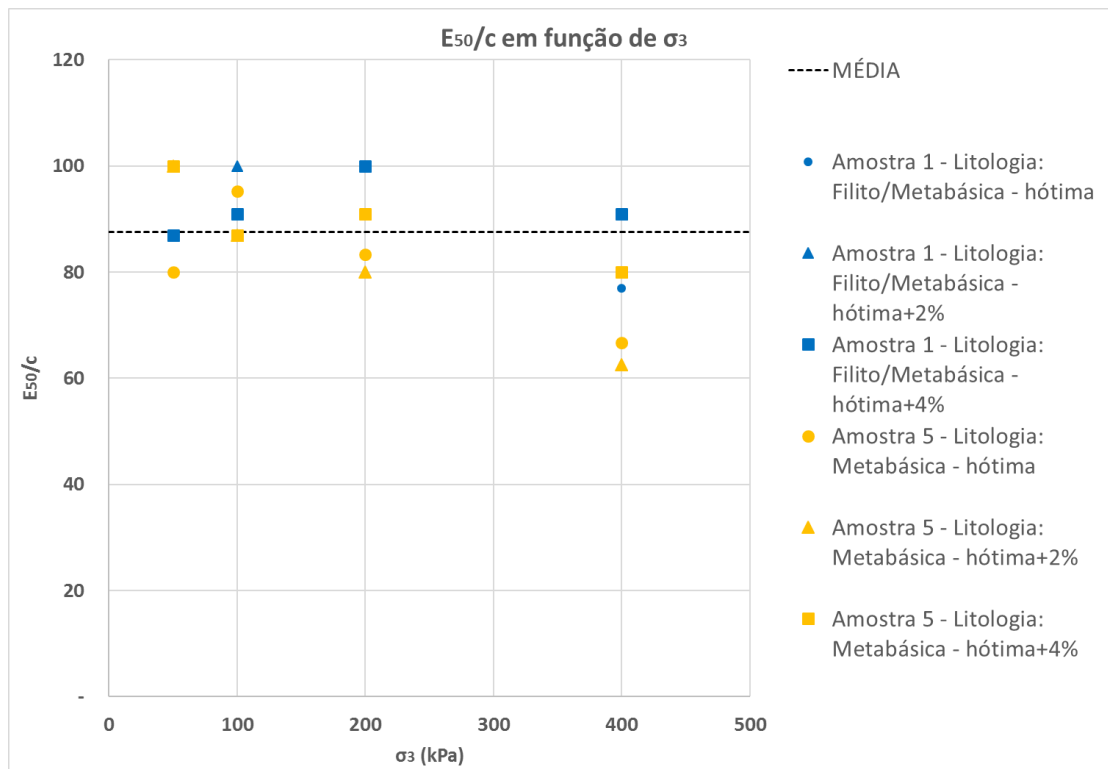
**Fonte:** Autora.

**Figura 73 –  $E_{50}/c$  em função de  $\sigma_3$  para Granito pouco milonitizado – Ensaio triaxial UU não saturado.**



**Fonte:** Autora.

**Figura 74** –  $E_{50}/c$  em função de  $\sigma_3$  para Metabásica – Ensaio triaxial UU não saturado.



**Fonte:** Autora.

**Tabela 17** – Valores médios obtidos de  $E_{50}/c$  para cada litologia – Ensaio triaxial UU não saturado.

Litologia	$E_{50}/c$	Desvio padrão
Filito	95	13
Granito pouco milonitizado	71	7
Ultramilonito	87	11
Metabásica	88	10

**Fonte:** Autora.

#### 4.3.2.2 Ensaio triaxiais CU saturado

As Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20 mostram os valores obtidos através de ensaios triaxiais CU para todos os desvios de umidade em relação à umidade ótima.

**Tabela 18**– Módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  -  $h_{ótima}$  – Ensaios triaxiais CU saturado.

Amostra	Litologia	$E_{50}$ (kPa)			
		$\sigma_3 = 50$ kPa	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 200$ kPa	$\sigma_3 = 400$ kPa
3	Filito	9.897	14.931	23.432	49.185
6	Ultramilonito	6.830	10.368	16.970	30.194
7	Granito pouco milonitizado	6.801	12.345	19.615	30.556

**Fonte:** Autora.

**Tabela 19**– Módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  -  $h_{ótima} +2\%$  – Ensaios triaxiais CU saturado.

Amostra	Litologia	$E_{50}$ (kPa)			
		$\sigma_3 = 50$ kPa	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 200$ kPa	$\sigma_3 = 400$ kPa
2	Filito	6.173	11.550	24.221	38.550
3	Filito	9.623	16.797	26.594	52.221
6	Ultramilonito	5.182	8.723	13.846	26.331
7	Granito pouco milonitizado	6.194	10.329	18.335	28.222

**Fonte:** Autora.

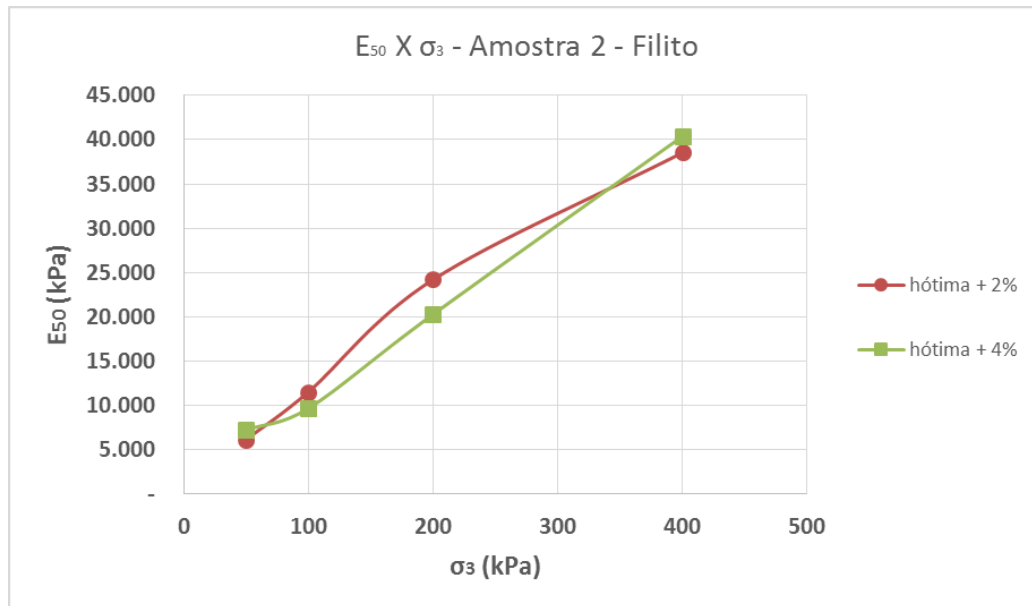
**Tabela 20**– Módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  -  $h_{ótima} +4\%$  – Ensaios triaxiais CU saturado.

Amostra	Litologia	$E_{50}$ (kPa)			
		$\sigma_3 = 50$ kPa	$\sigma_3 = 100$ kPa	$\sigma_3 = 200$ kPa	$\sigma_3 = 400$ kPa
2	Filito	7.273	9.696	20.302	40.392
3	Filito	6.905	13.173	23.650	36.646
6	Ultramilonito	5.674	9.488	17.381	31.524
7	Granito pouco milonitizado	5.575	9.930	20.484	31.753

**Fonte:** Autora.

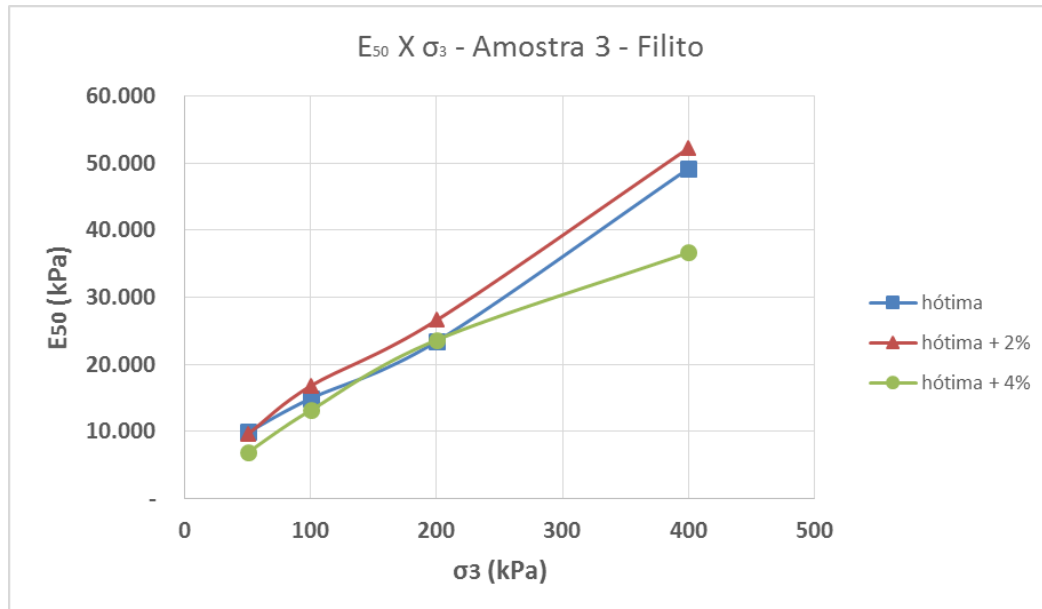
As Figura 75 a Figura 78 mostram gráficos do módulo de deformabilidade secante a 50% da tensão de ruptura versus a tensão de confinamento,  $\sigma_3$ , para cada amostra, variando o desvio de umidade, para os ensaios triaxiais CU saturados.

**Figura 75** – Módulo de deformabilidade  $E_{50}$  versus  $\sigma_3$  – Amostra 2 – Filito – Ensaio triaxial CU saturado.



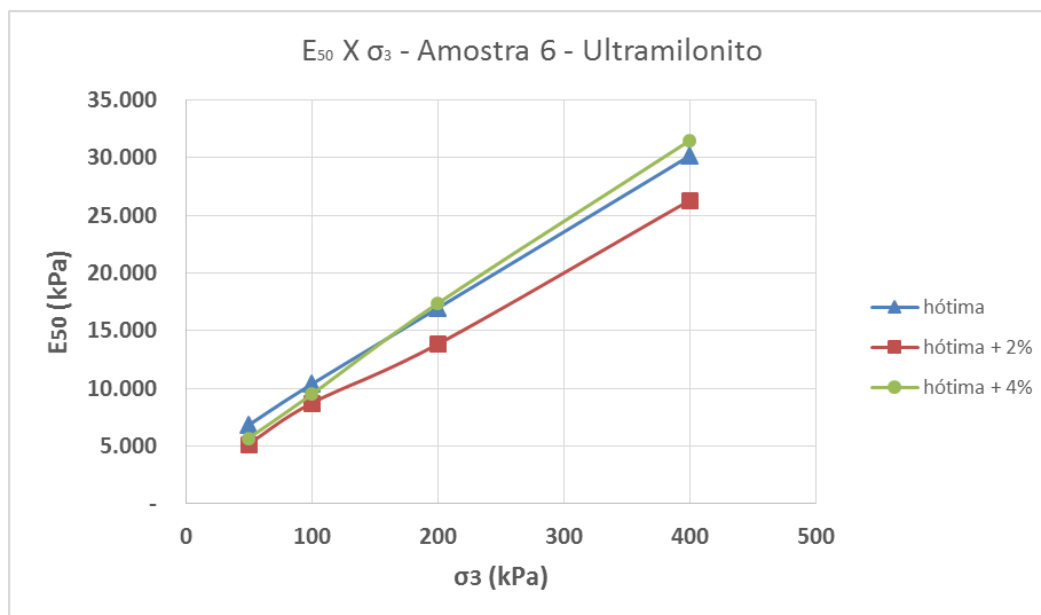
**Fonte:** Autora.

**Figura 76** – Módulo de deformabilidade  $E_{50}$  versus  $\sigma_3$  – Amostra 3 – Filito – Ensaio triaxial CU saturado.



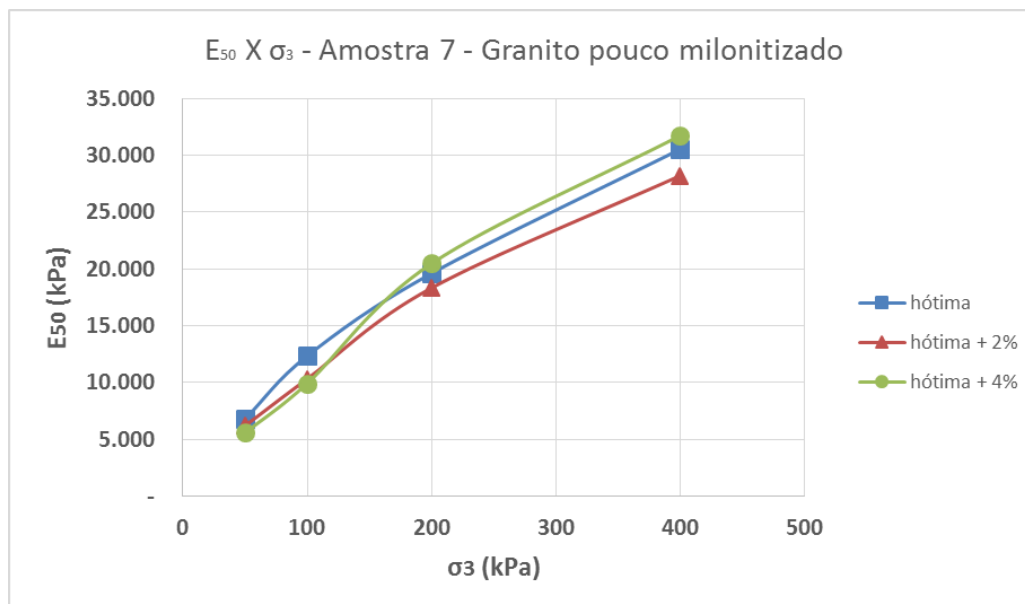
**Fonte:** Autora.

**Figura 77** – Módulo de deformabilidade  $E_{50}$  versus  $\sigma_3$  – Amostra 6 – Ultramilonito – Ensaio triaxial CU saturado.



**Fonte:** Autora.

**Figura 78** – Módulo de deformabilidade  $E_{50}$  versus  $\sigma_3$  – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado – Ensaio triaxial CU saturado.

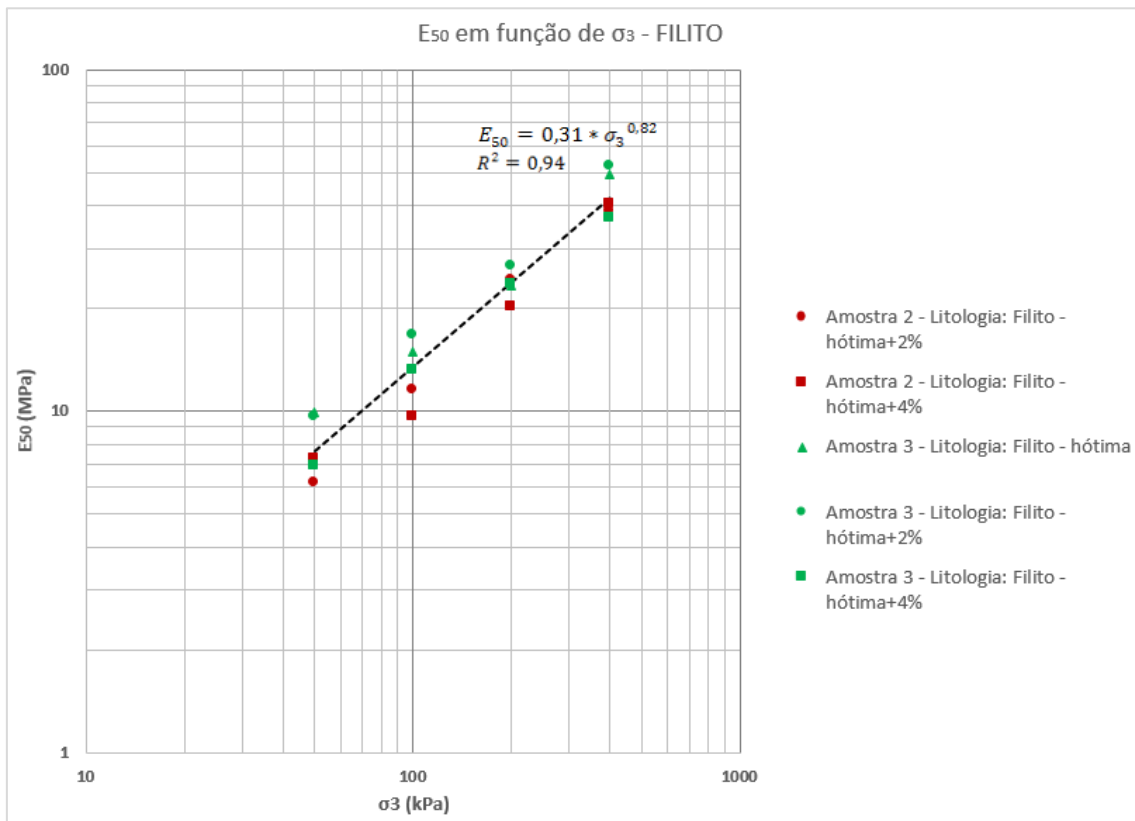


**Fonte:** Autora.

Os maiores valores de  $E_{50}$  obtidos para os ensaios triaxiais CU saturado foram para a amostra 2 (filito) e os menores valores, para ultramilonito (amostra 6).

A seguir, foi analisado o módulo de deformabilidade ( $E_{50}$ ) em função da tensão confinante ( $\sigma_3$ ), conforme expressão (32), separados por litologia, para o ensaio triaxial CU não saturado. Foram obtidas correlações também separadas por litologia (Figura 79 a Figura 81).

**Figura 79** – Módulo de deformabilidade em função da tensão confinante para amostras 2 e 3 – Filito – Ensaio triaxial CU saturado.



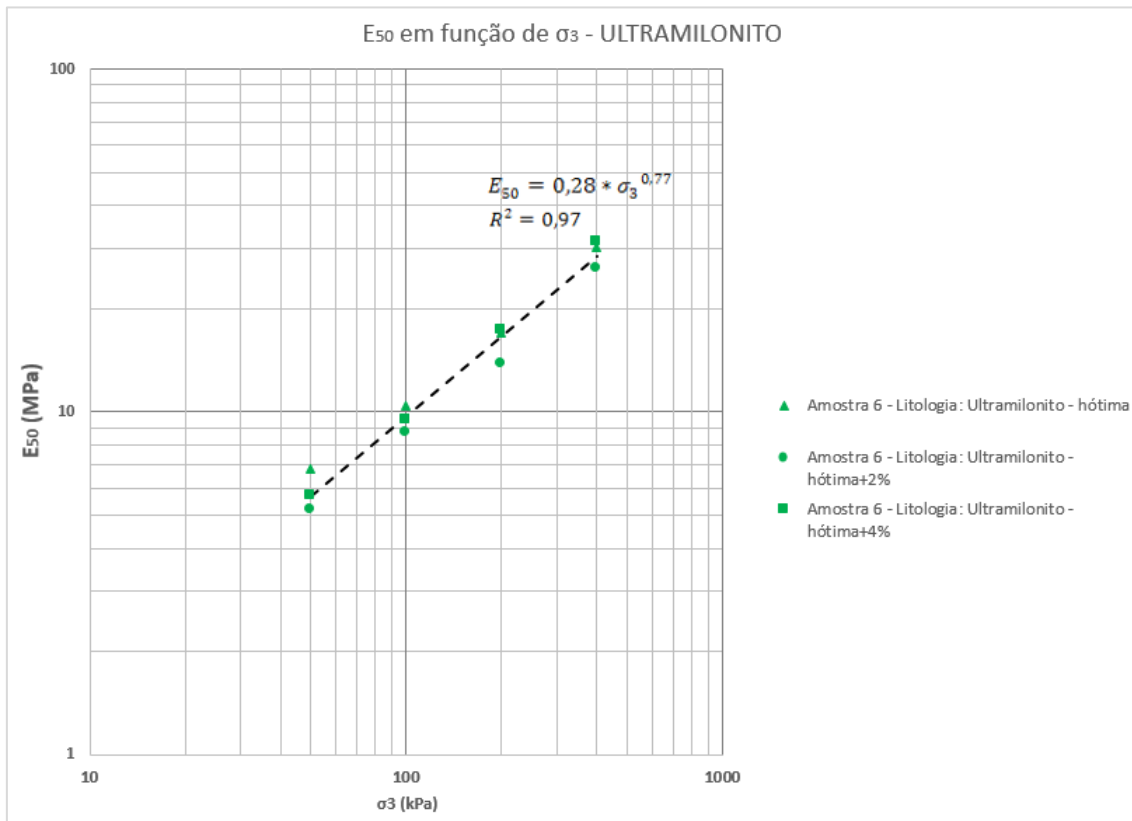
**Fonte:** Autora.

$$E_{50} = 0,31 * \sigma_3^{0,82}; R^2 = 0,94 \quad (37)$$

onde  $\sigma_3$  está em kPa e  $E_{50}$ , em MPa.



**Figura 80** – Módulo de deformabilidade em função da tensão confinante para amostra 6 – Ultramilonito – Ensaio triaxial CU saturado.

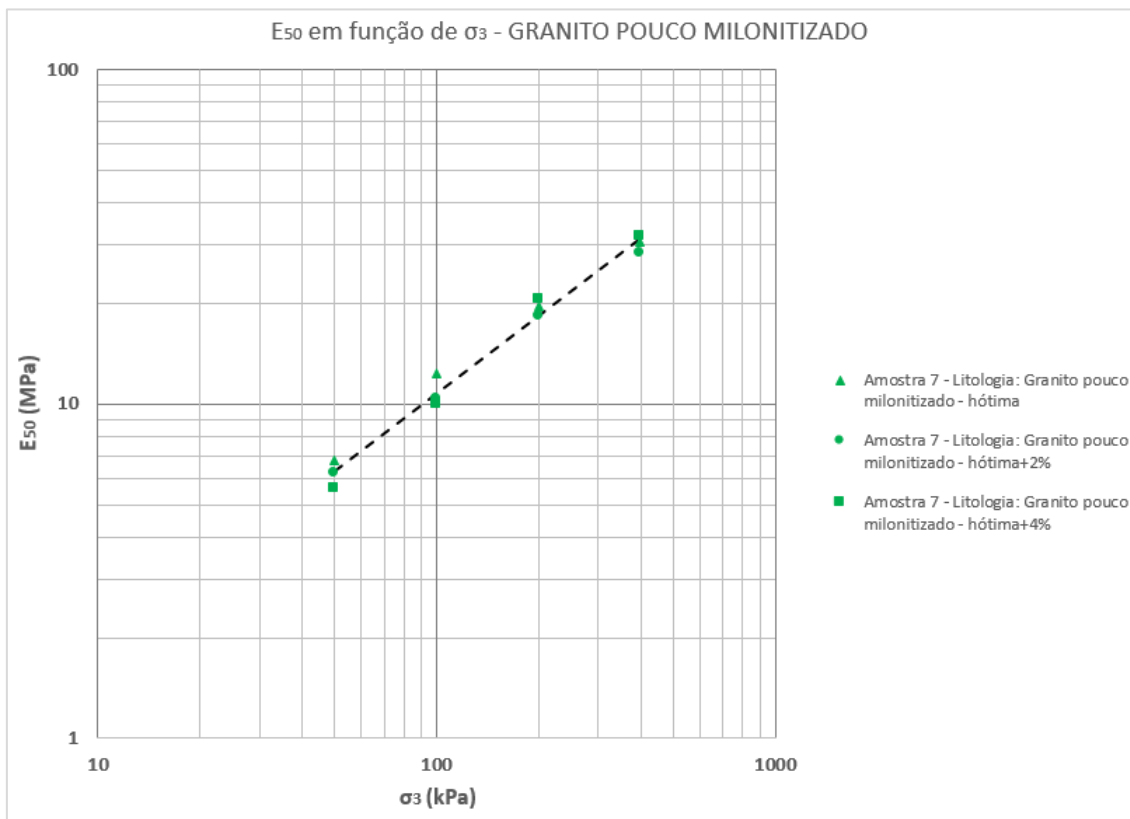


**Fonte:** Autora.

$$E_{50} = 0,28 * \sigma_3^{0,77}; R^2 = 0,97 \quad (38)$$

onde  $\sigma_3$  está em kPa e  $E_{50}$ , em MPa.

**Figura 81** – Módulo de deformabilidade em função da tensão confinante para amostra 7 – Granito pouco milonitizado – Ensaio triaxial CU saturado.



**Fonte:** Autora.

$$E_{50} = 0,31 * \sigma_3^{0,77}; R^2 = 0,98 \quad (39)$$

onde  $\sigma_3$  está em kPa e  $E_{50}$ , em MPa.

A Tabela 21 mostra os valores do coeficiente “a” e “n” obtidos para a correlação 32 para os ensaios triaxiais CU saturado.

**Tabela 21** – Resumo dos coeficientes para ensaio triaxial CU saturado.

	<b>a</b>	<b>n</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Filito	0,31	0,82	0,94
Ultramilonito	0,28	0,77	0,97
Granito pouco milonitizado	0,31	0,77	0,98

**Fonte:** Autora.

Em média, considerando o universo de todas as litologias, obteve-se:

$$E_{50} = 0,30 * \sigma_3^{0,80} \quad (40)$$

onde  $\sigma_3$  está em kPa e  $E_{50}$ , em MPa.

#### 4.4 ENSAIOS TRIAXIAIS PN

A partir dos ensaios triaxiais PN foi possível obter o parâmetro de pressão neutra,  $\bar{B}$ , e o módulo de deformabilidade tangente inicial,  $E_i$ . O Apêndice E mostra os gráficos de tensão desviadora e de pressão neutra em função da deformação.

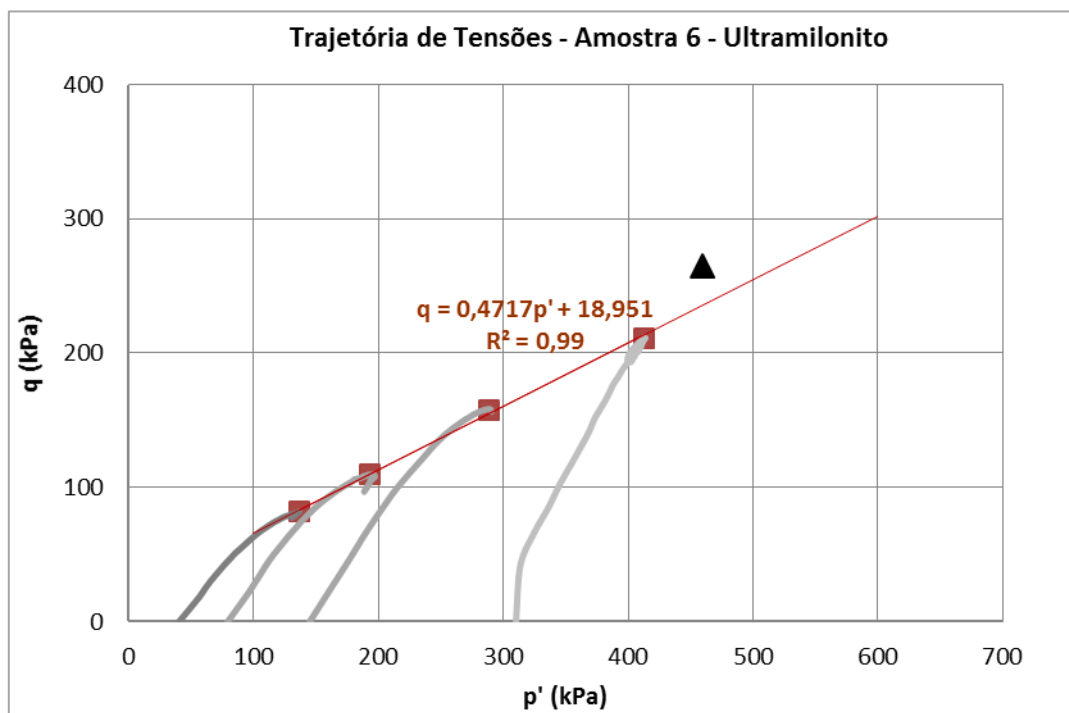
A partir destes gráficos, observa-se também que houve ruptura em corpos de prova da amostra 6 (ultramilonito) para os ensaios com desvios de umidade em relação a ótima iguais a 4% e 5%. De fato, para o caso da amostra 6 e desvio de umidade de 4%, obtêm-se as tensões principais totais e efetivas e a pressão neutra na ruptura, conforme Tabela 22. Dessa forma, foi possível determinar os valores de  $p'$  e  $q'$ , que, lançados na Figura 82, confirmam a ruptura mencionada acima.

**Tabela 22** - Tensões principais totais e efetivas e a pressão neutra na ruptura – Ensaio triaxial PN, com  $\Delta h=4\%$  - Amostra 6.

$\sigma_1-\sigma_3$	530	kPa
$\sigma_3$	530	kPa
$\sigma_1$	1060	kPa
u	336	kPa
$\sigma'_1$	724	kPa
$\sigma'_3$	194	kPa
$p'$	459	kPa
$q'$	265	kPa

**Fonte:** Autora.

**Figura 82** – Gráfico de trajetória de tensões e envoltória de Mohr Coulomb (ensaio triaxial UU não saturado) – Amostra 6 –  $\Delta h = 4\%$ .



**Fonte:** Autora.

#### 4.4.1 Parâmetro de pressão neutra, $\bar{B}$

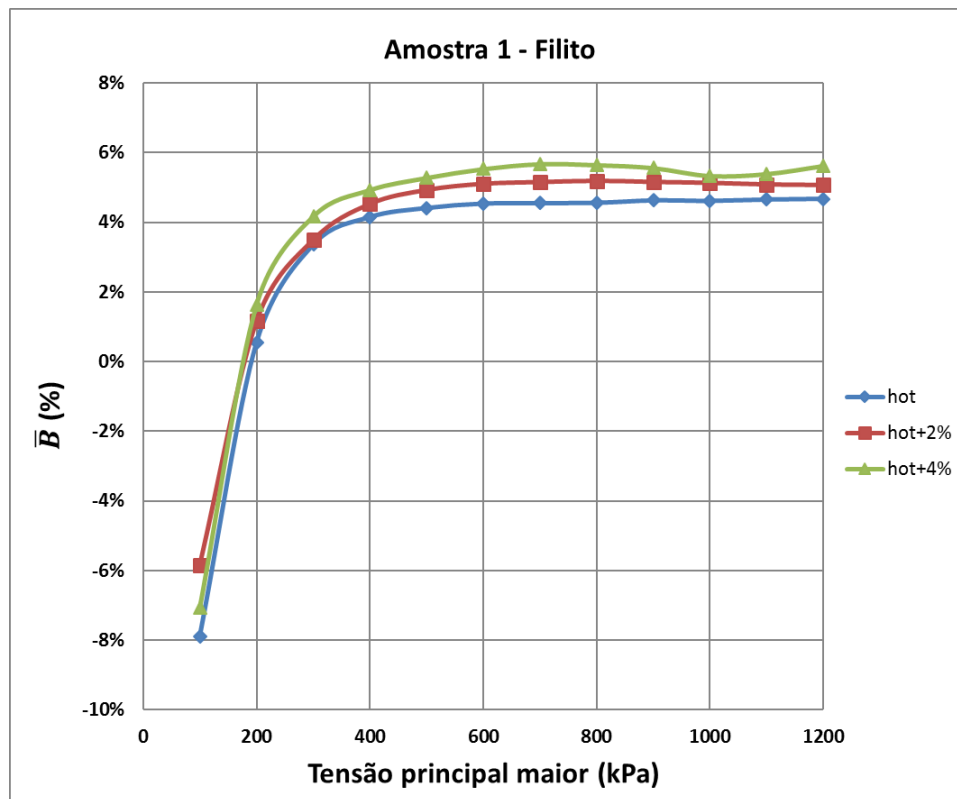
O parâmetro de pressão neutra foi obtido para ensaios PN nos quais a relação entre tensões principais  $k = \sigma_3 / \sigma_1 = 0,5$ , para valores de umidades de compactação ótima e acima dessa.

Segundo Cruz (1996), análises numéricas realizadas mostram que no alteamento de uma barragem hipotética de argila até a metade da altura do núcleo, os valores de  $k = \sigma_3 / \sigma_1$  se mantiveram entre 0,50 e 0,60, justificando o valor adotado.

##### 4.4.1.1 Resultados obtidos

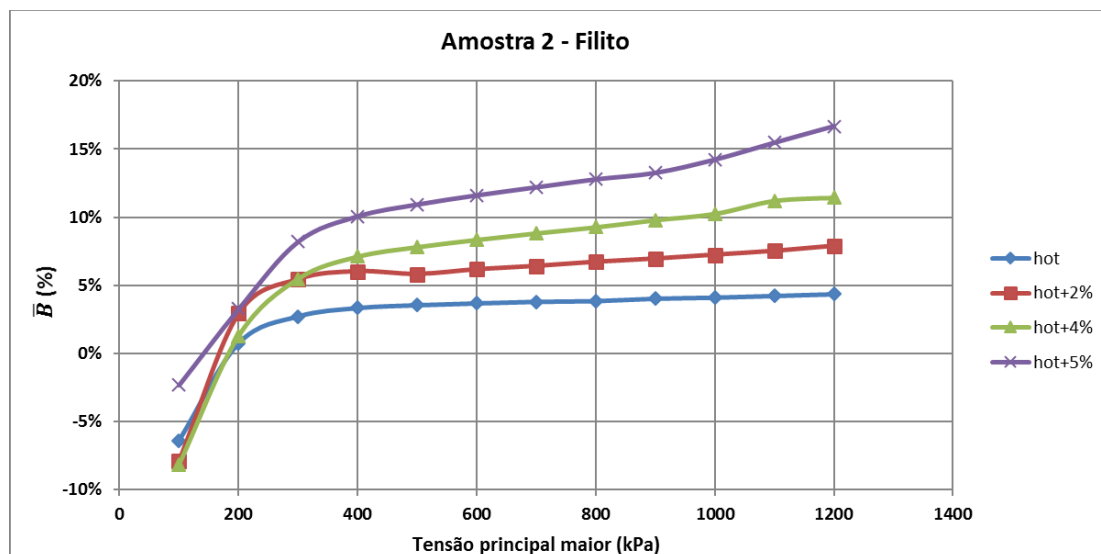
A Figura 83 a Figura 88 mostram as variações de  $\bar{B}$  com a tensão principal maior ( $\sigma_1$ ) para as diversas amostras.

**Figura 83** – Curva do parâmetro neutra  $\bar{B}$  em função da tensão principal maior,  $\sigma_1$  – Amostra 1 – Litologia: Filito.



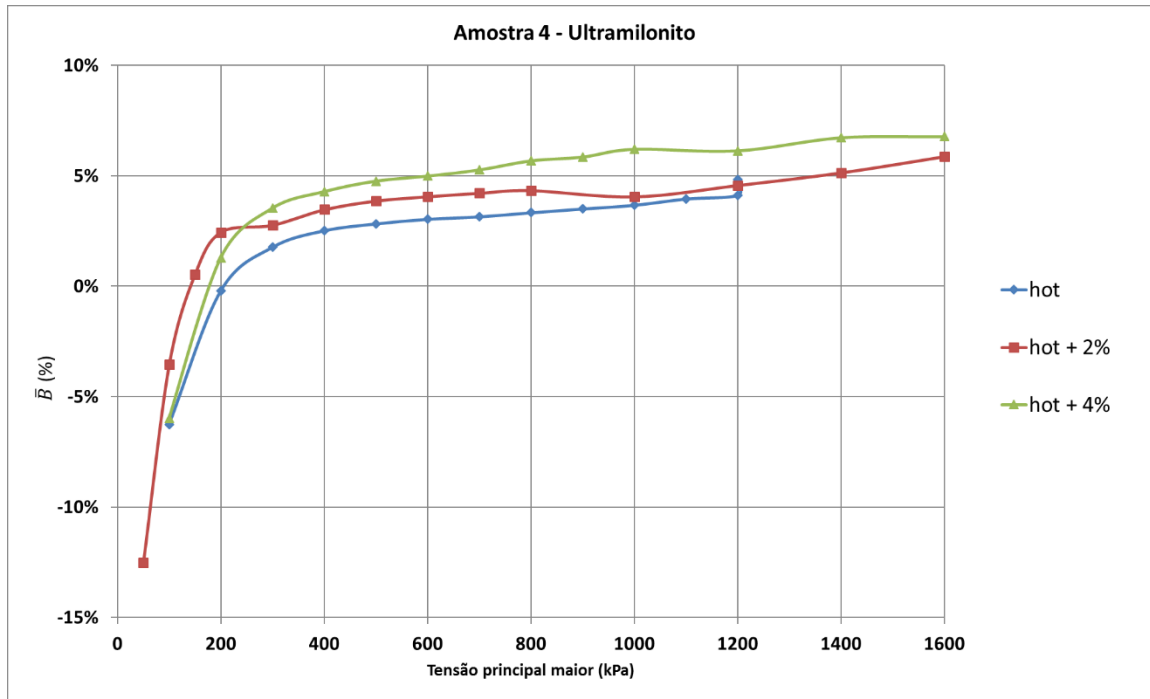
Fonte: Autora.

**Figura 84** – Curva do parâmetro neutra  $\bar{B}$  em função da tensão principal maior,  $\sigma_1$  – Amostra 2 – Litologia: Filito.



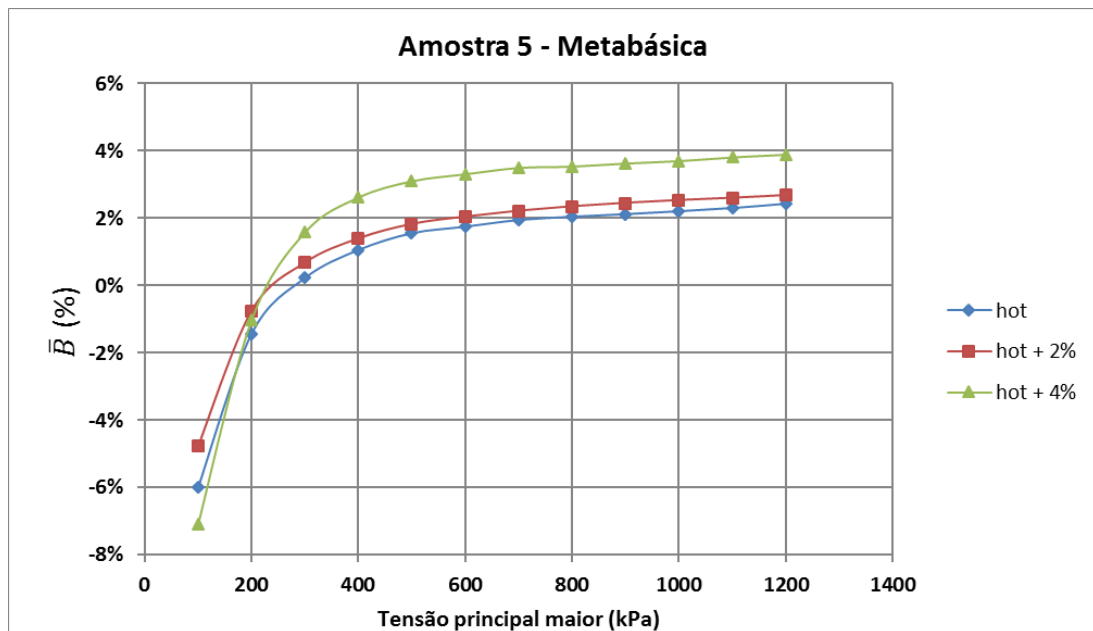
Fonte: Autora.

**Figura 85** – Curva do parâmetro neutra  $\bar{B}$  em função da tensão principal maior,  $\sigma_1$  – Amostra 4 – Litologia: Ultramilonito.



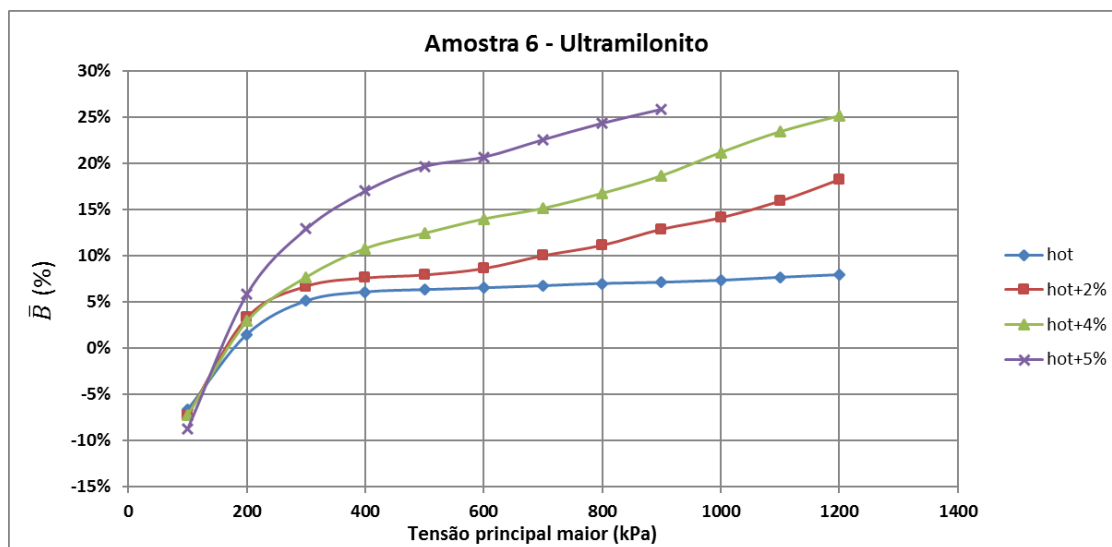
Fonte: Autora.

**Figura 86** – Curva do parâmetro neutra  $\bar{B}$  em função da tensão principal maior,  $\sigma_1$  – Amostra 5 – Litologia: Metabásica.



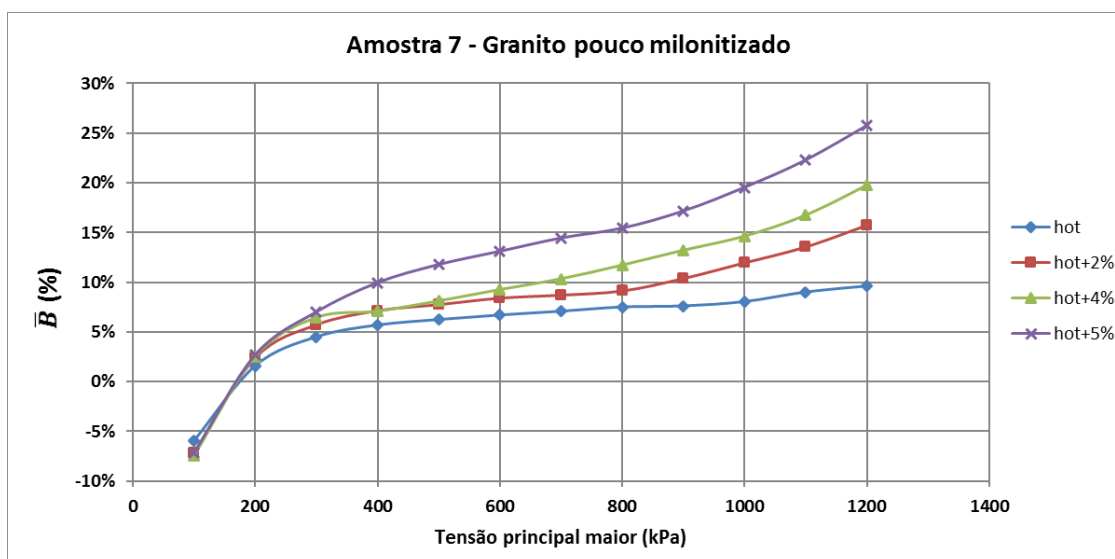
Fonte: Autora.

**Figura 87** – Curva do parâmetro neutra  $\bar{B}$  em função da tensão principal maior,  $\sigma_1$  – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito.



**Fonte:** Autora.

**Figura 88** – Curva do parâmetro neutra  $\bar{B}$  em função da tensão principal maior,  $\sigma_1$  – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado.



**Fonte:** Autora.

Como foi possível observar, nos ensaios a tensão principal maior ( $\sigma_1$ ) variou entre 0 e 1.200 kPa, a fim de simular as condições de alteamento dos aterros da obra em estudo. Nota-se que para as amostras 1, 4 e 5, quando se passa de  $\sigma_1=600$  kPa a  $\sigma_1=1000$  kPa,  $\bar{B}$  varia pouco (Figura 83, Figura 85 e Figura 86).

Com baixos carregamentos, até aproximadamente 200 kPa, os valores de  $\bar{B}$  são negativos, conforme explicação de Pacheco Silva, no item 2.4. Todas as amostras ensaiadas apresentaram este tipo de comportamento, conforme visto nas Figura 83 a Figura 88. Nessas condições, chama a atenção o fato dos valores de  $\bar{B}$  serem praticamente convergentes para um mesmo ponto, para  $\sigma_1=100$  kPa, fato que pode ser atribuído aos relativamente baixos graus de saturação dos corpos de prova, variando de 56 a 84% para  $\Delta h=0$  a até 4% e mesmo 5%, como pode ser visto nas Tabela 92 a Tabela 97 do Apêndice E. Conjectura-se que o ar presente nos vazios esteja na pressão atmosférica, pois para solos com baixo grau de saturação, os poros preenchidos por ar são intercomunicantes (Pacheco Silva, 1972).

A Tabela 23 mostra o parâmetro  $\bar{B}$  para uma tensão principal maior de 1.000 kPa.

**Tabela 23** - Parâmetro de pressão neutra para  $\sigma_1 = 1.000$  kPa.

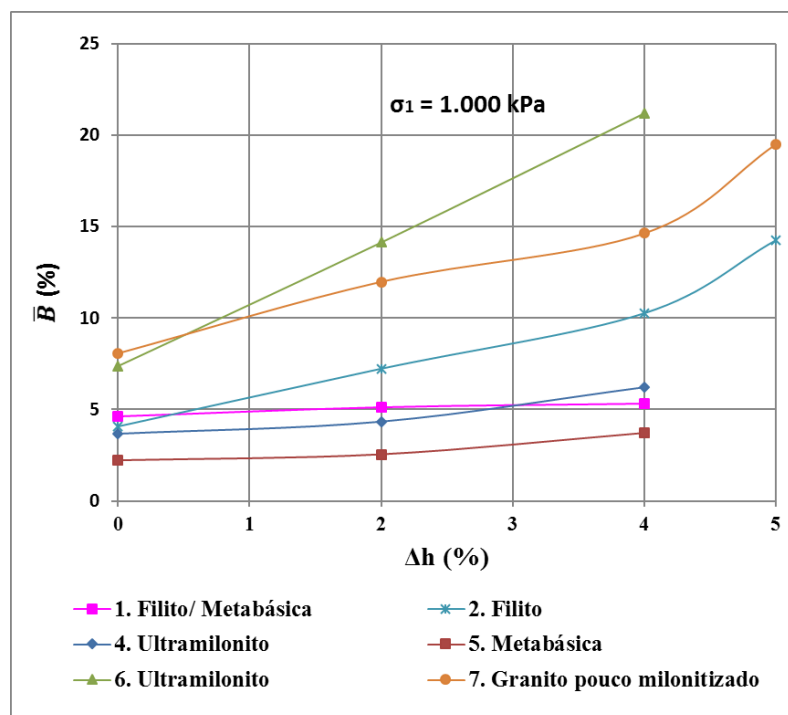
		$\bar{B}$			
Amostra	Litologia	$\Delta h$ (%)			
		0	2	4	5
1	Filito/ Metabásica	4,61%	5,13%	5,33%	
2	Filito	4,09%	7,24%	10,25%	14,22%
4	Ultramilonito	3,67%	4,34%	6,20%	
5	Metabásica	2,20%	2,53%	3,70%	
6	Ultramilonito	7,34%	14,12%	21,21%	
7	Granito pouco milonitizado	8,04%	11,97%	14,62%	19,51%

**Fonte:** Autora.

Como os ensaios foram realizados para diversos desvios de umidade em relação à umidade ótima ( $\Delta h$ ), foi possível preparar o gráfico de  $\bar{B}$  em função de  $\Delta h$ , conforme a Figura 89. De sua análise conclui-se que, para tensões elevadas ( $\sigma_1 = 1.000$  kPa), o  $\bar{B}$  pode variar de 2% a 21%. Os menores valores referem-se à amostra 5 (metabásica) e os maiores, às amostras 6 (ultramilonito) e 7 (granito pouco milonitizado).



**Figura 89** – Parâmetro de pressão neutra,  $\bar{B}$ , em função do desvio de umidade em relação à ótima ( $\Delta h$ ) para  $\sigma_1 = 1.000$  kPa.

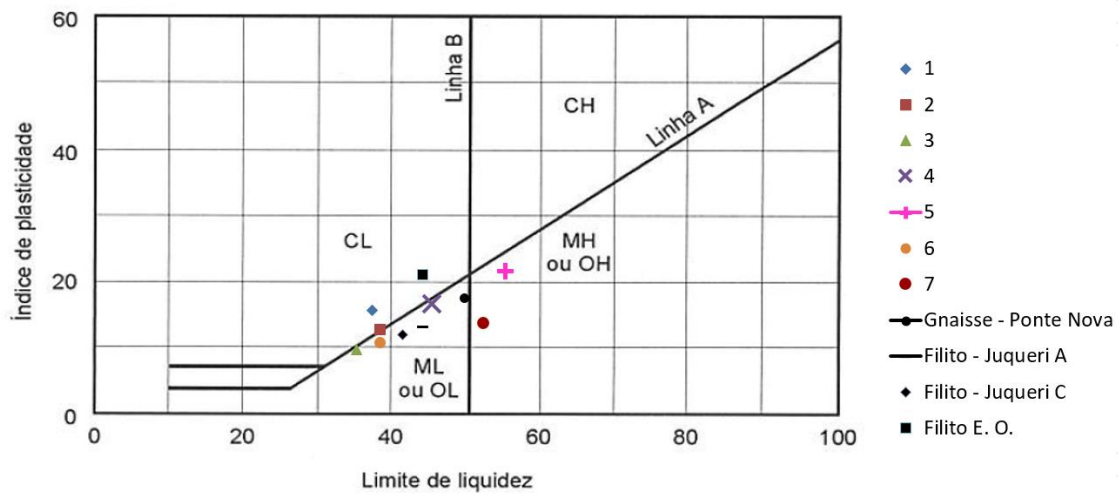


**Fonte:** Autora.

#### 4.4.1.2 Comparação com dados da literatura

Na Tabela 3, no item 2.3.3, são apresentadas as características do solo de gnaiss da barragem de Ponte Nova e do solo de filito da barragem de Juqueri A, Juqueri C e Filito E. O. Na Tabela 6, no item 4.1, são apresentadas as características das amostras 1 e 2, respectivamente. Como é possível observar, as características destes solos são semelhantes, como por exemplo baixo percentual de argila e valores de índice de plasticidade semelhantes. A Figura 90 mostra a Carta de Plasticidade de Casagrande, comparando as amostras ensaiadas com os valores da bibliografia de Cruz (1967). É possível observar que todas as amostras possuem características semelhantes. Tal fato justificaria os valores de  $\bar{B}$  semelhantes.

**Figura 90** – Carta de Plasticidade de Casagrande – Amostras ensaiadas e valores da bibliografia.



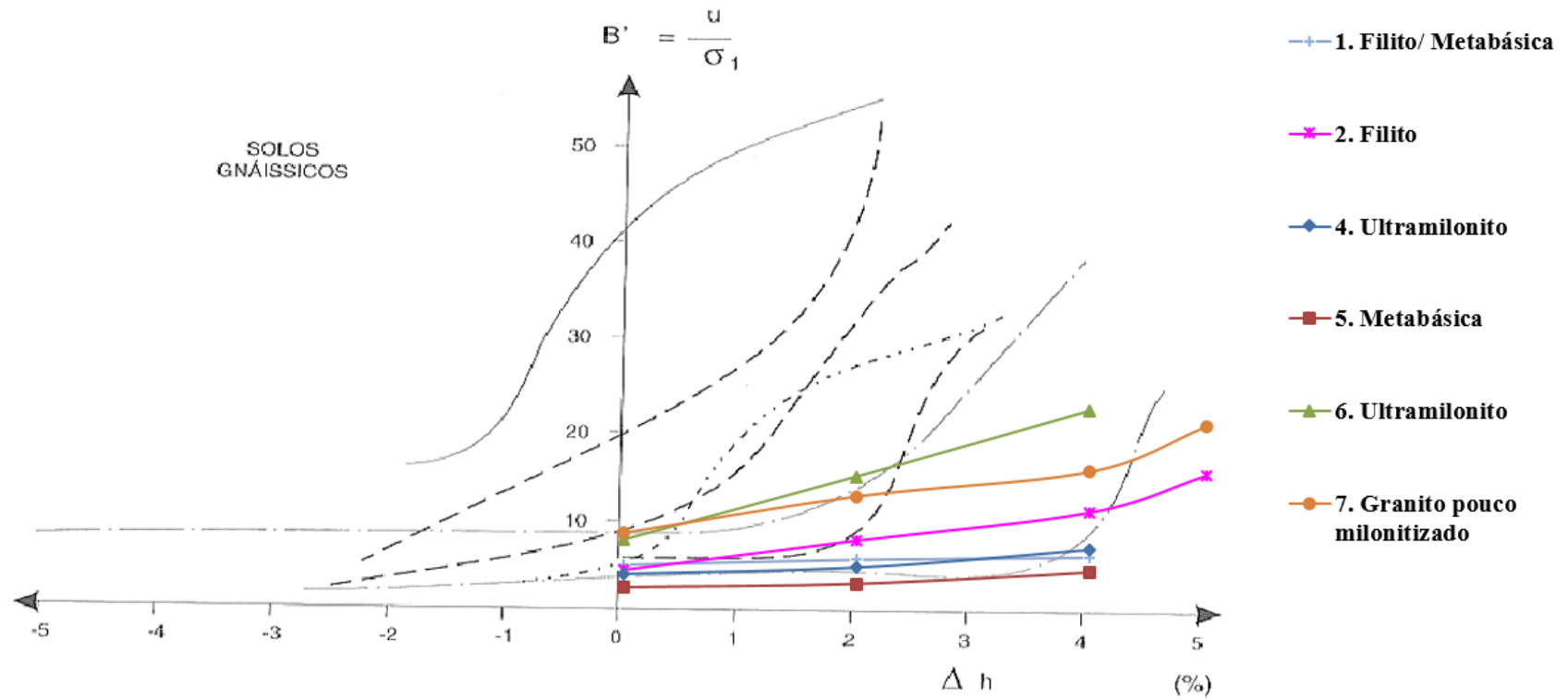
**Fonte:** Autora.

A Figura 91 permite comparar o parâmetro de pressão neutra,  $\bar{B}$ , obtido com valores retirados do livro de Cruz (1996) para solos gnáissicos, provavelmente associados ao valor de tensão principal máxima ( $\sigma_1$ ) igual a 1000 kPa. Como se viu acima, para as amostras 1, 4 e 5, quando se passa de  $\sigma_1=600$  kPa a  $\sigma_1=1000$  kPa,  $\bar{B}$  varia pouco com  $\sigma_1$ .

Assim, observa-se que para os parâmetros  $\bar{B}$  obtidos a partir de ensaios apresentam variações de acordo com a litologia do solo ensaiado. O valor máximo obtido foi para ultramilonitos, sendo igual a aproximadamente 21%, enquanto o menor valor foi de 1,75% para a metabásica. Quando comparados com valores de solos gnáissicos retirados da bibliografia, apresentam valores bem inferiores.

A Figura 92 mostra a comparação de  $\bar{B}$  obtidos para a amostra 1 com valores retirados de Cruz (1967) para solos de filito. Observa-se que para os parâmetros  $\bar{B}$  obtidos a partir de ensaios com a amostra 1 apresentam valores muito próximos aos valores da bibliografia. Observa-se também que os valores de  $\bar{B}$  obtidos nos ensaios com a amostra 1 variando o desvio de umidade não apresentam grande variação.

**Figura 91** - Comparação entre parâmetro de pressão neutra,  $\bar{B}$ , obtidos a partir de ensaios com os retirados do livro de Cruz (1996) para solos gnáissicos.



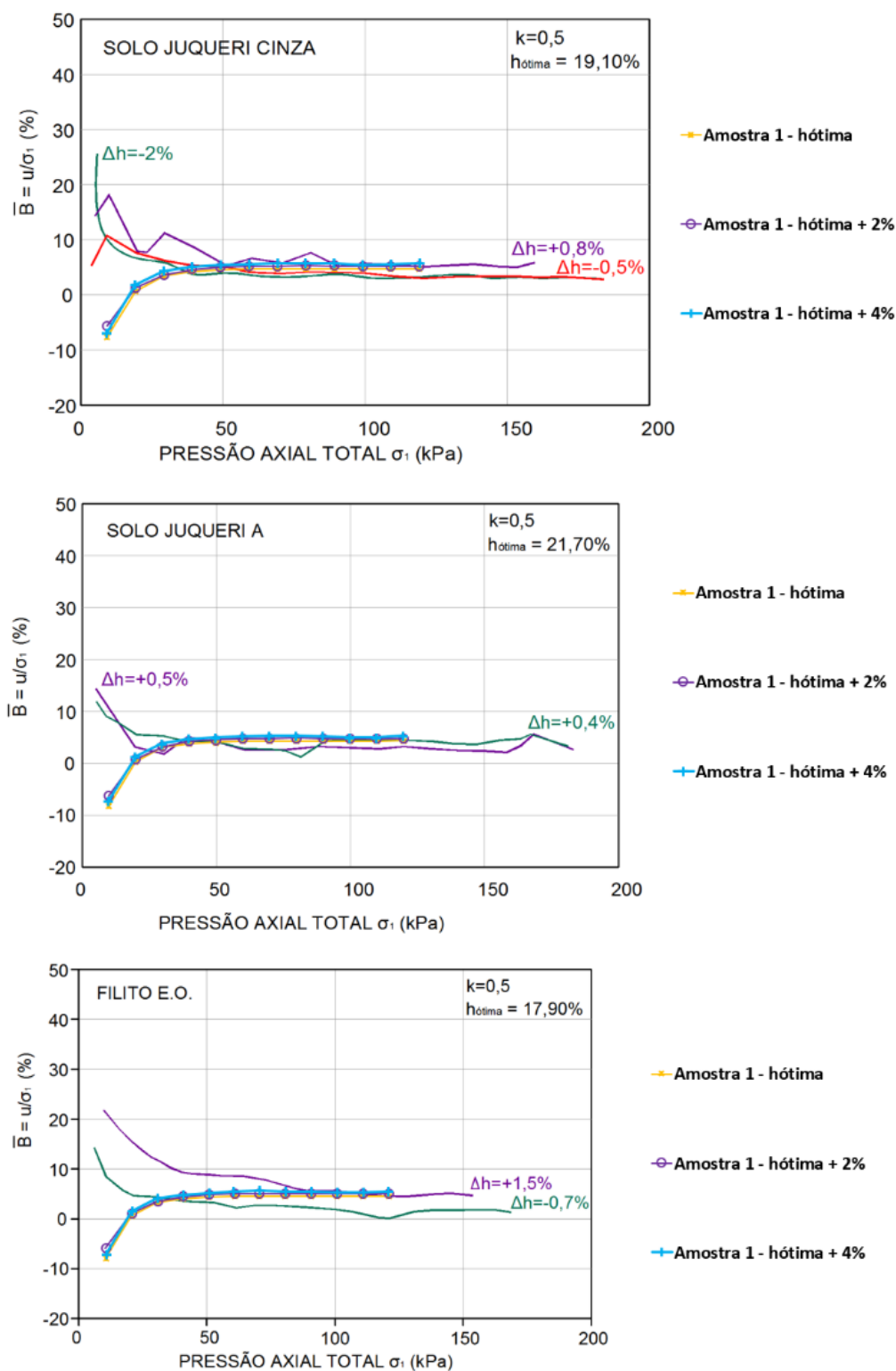
**Fonte:** Autora.

A Figura 93 mostra a comparação de  $\bar{B}$  obtidos para a amostra 1 com valores retirados de Cruz (1967) para solo de gnaïsse de um aterro experimental na barragem de Ponte Nova. Observa-se que os valores de  $\bar{B}$  obtidos a partir de ensaio com a amostra apresentam valores muito próximos aos valores de solos gnáïssicos retirados da bibliografia.

A Figura 94 mostra a comparação de  $\bar{B}$  obtidos para a amostra 2 com valores retirados de Cruz (1967) para solos de filito. Como é possível observar, os valores de  $\bar{B}$  obtidos para a amostra 2 na umidade ótima praticamente coincidem com os valores de  $\bar{B}$  da bibliografia. Os valores de  $\bar{B}$  obtidos com desvios de umidade em relação à ótima iguais a 2%, 4% e 5% são superiores aos valores da bibliografia.

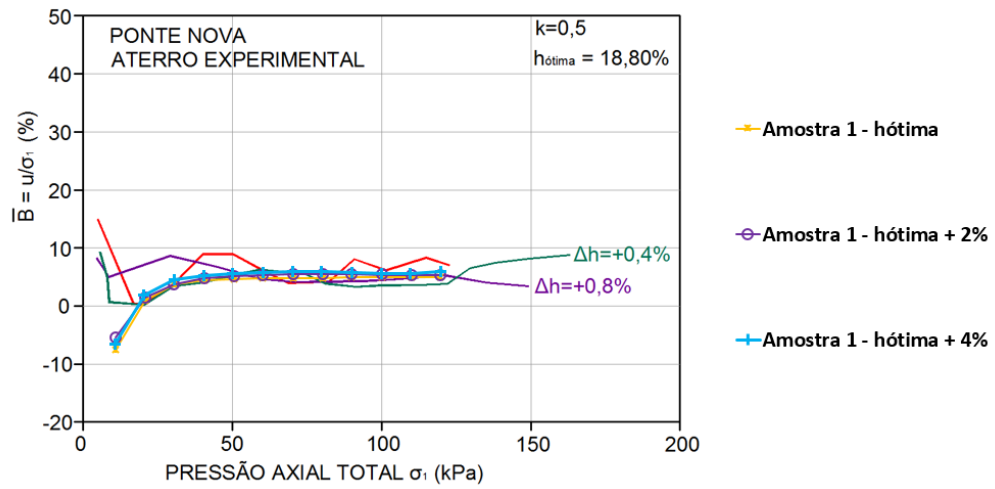
A Figura 95 mostra a comparação de  $\bar{B}$  obtidos para a amostra 2 com valores retirados de Cruz (1967) para solo de gnaïsse de um aterro experimental na barragem de Ponte Nova. Os valores de  $\bar{B}$  obtidos com a amostra 2 na umidade ótima apresentam valores levemente superiores aos da bibliografia. Enquanto os valores de  $\bar{B}$  da bibliografia são, em sua maioria, inferiores a 10%, os valores de  $\bar{B}$  obtidos a partir de ensaios com a amostra 2 são levemente superiores: quando a tensão principal é superior a 400 kPa, os valores de  $\bar{B}$  ficam entre 10% e 20%.

**Figura 92** - Comparação entre parâmetro de pressão neutra,  $\bar{B}$ , obtidos a partir de ensaios com a amostra 1 com os retirados de Cruz (1967) para solos de filito.



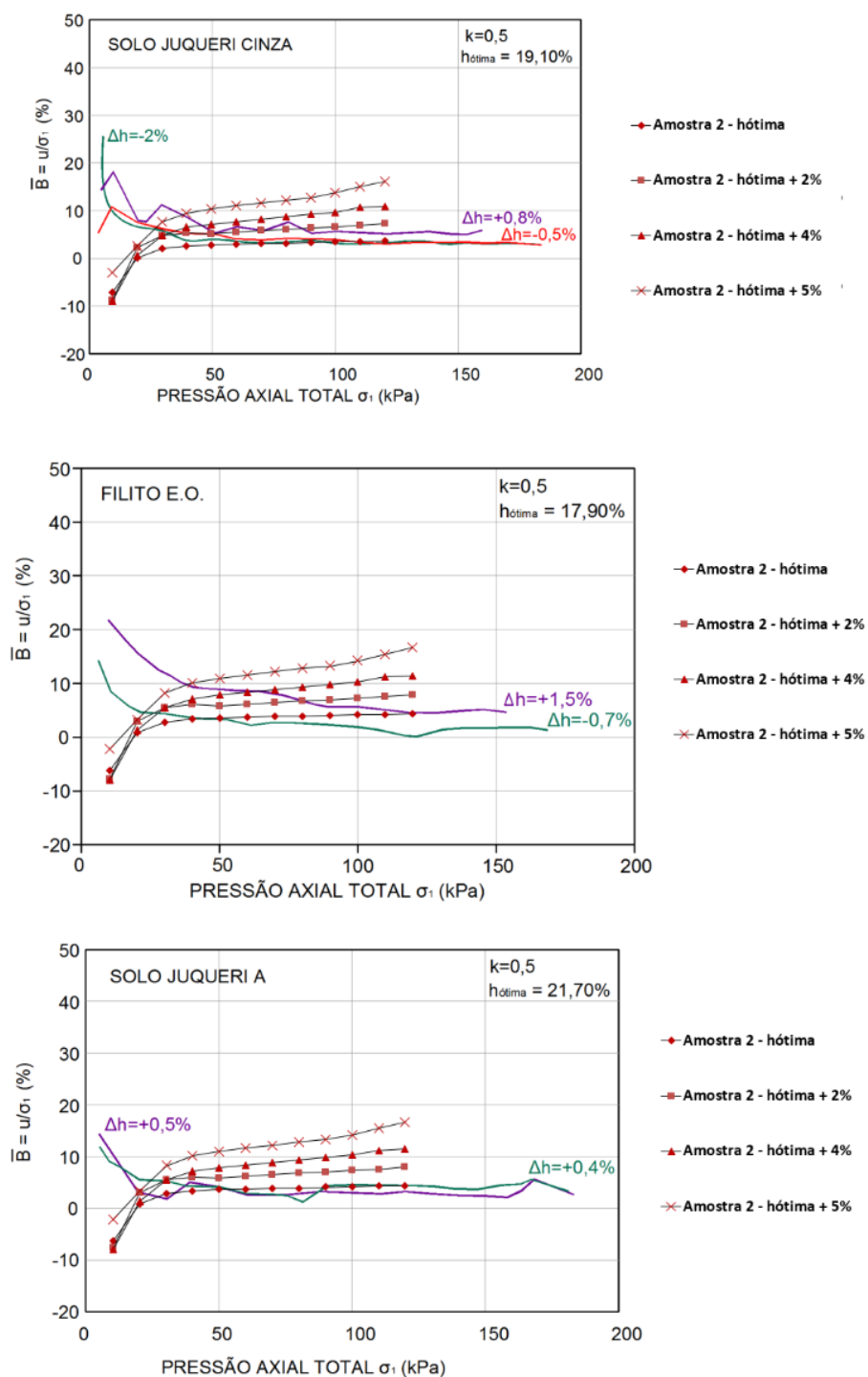
Fonte: Autora.

**Figura 93** - Comparação entre parâmetro de pressão neutra,  $\bar{B}$ , obtidos a partir de ensaios com a amostra 1 com os retirados de Cruz (1967) para solo de gnaiss.



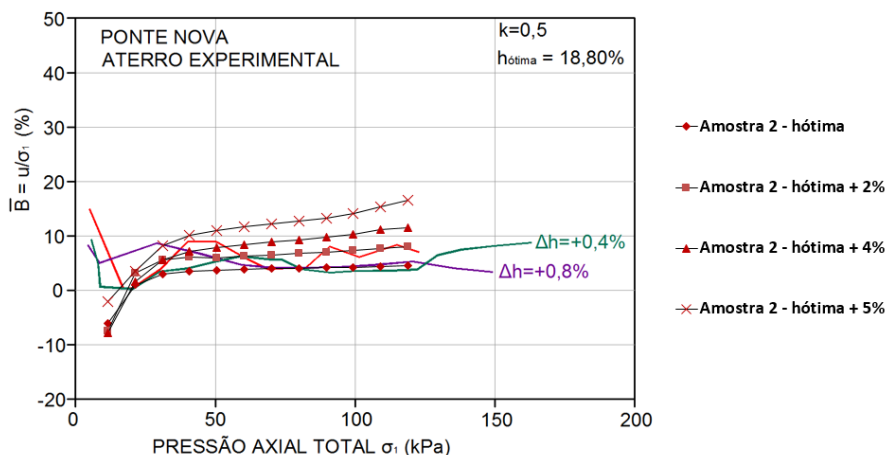
Fonte: Autora.

**Figura 94** - Comparação entre parâmetro de pressão neutra,  $\bar{B}$ , obtidos a partir de ensaios com a amostra 2 com os retirados de Cruz (1967) para solos de filito.



Fonte: Autora.

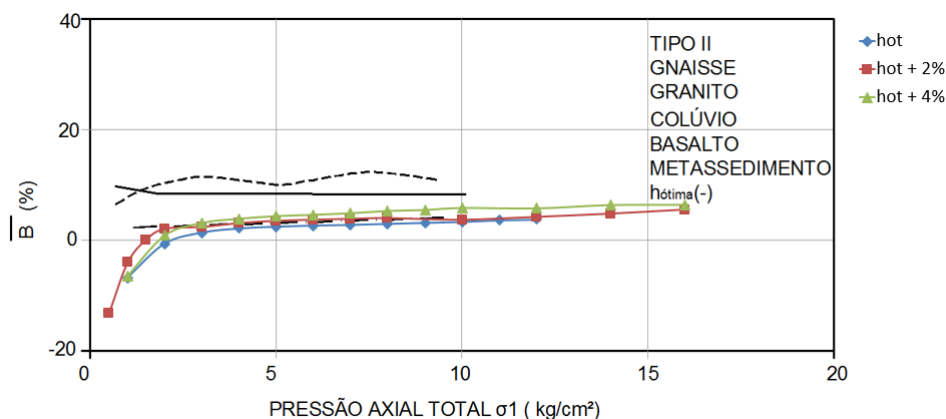
**Figura 95** - Comparação entre parâmetro de pressão neutra,  $\bar{B}$ , obtidos a partir de ensaios com a amostra 2 com os retirados de Cruz (1967) para solo de gnaisse.



**Fonte:** Autora.

As Figura 96 a Figura 98 mostram a comparação do parâmetro de pressão neutra,  $\bar{B}$ , obtido para as amostras 4, 5 e 6, respectivamente, com valores retirados de Cruz (1996). Observa-se que os parâmetros  $\bar{B}$  obtidos a partir de ensaios estão relativamente próximos aos valores da bibliografia obtidos para corpos de prova moldados com umidade de compactação acima da umidade ótima. Além disso, observa-se que para tensões axiais baixas, da ordem de 0 a 200 kPa, os valores de  $\bar{B}$  obtidos através de ensaios de laboratório são menores que 0%, devido ao aumento da pressão de sucção, conforme explicado no início desta seção e na seção 2.4.

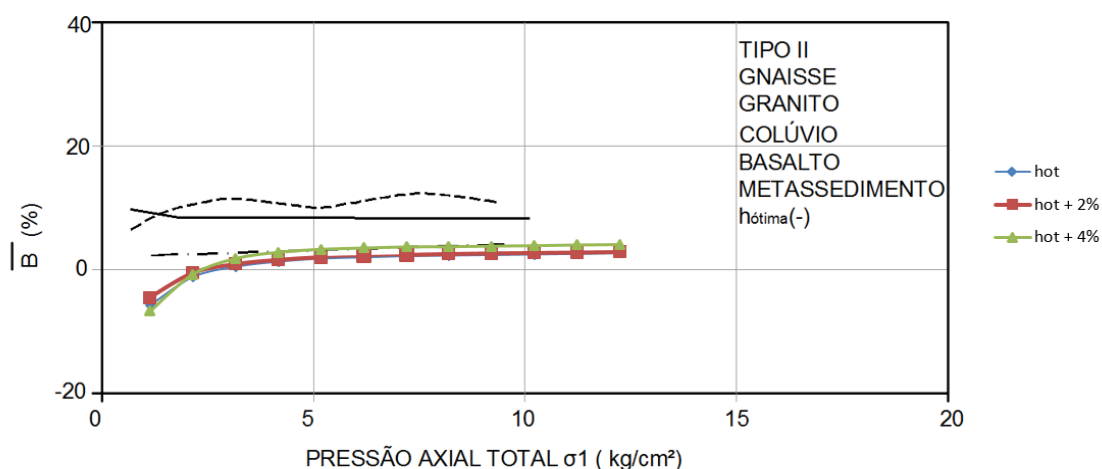
**Figura 96** - Comparação entre parâmetro de pressão neutra,  $\bar{B}$ , obtidos a partir de ensaios da amostra 4 com os retirados do livro de Cruz (1996). Nota:  $1\text{kg/cm}^2 \approx 100\text{ kPa}$ .



**Fonte:** Autora.

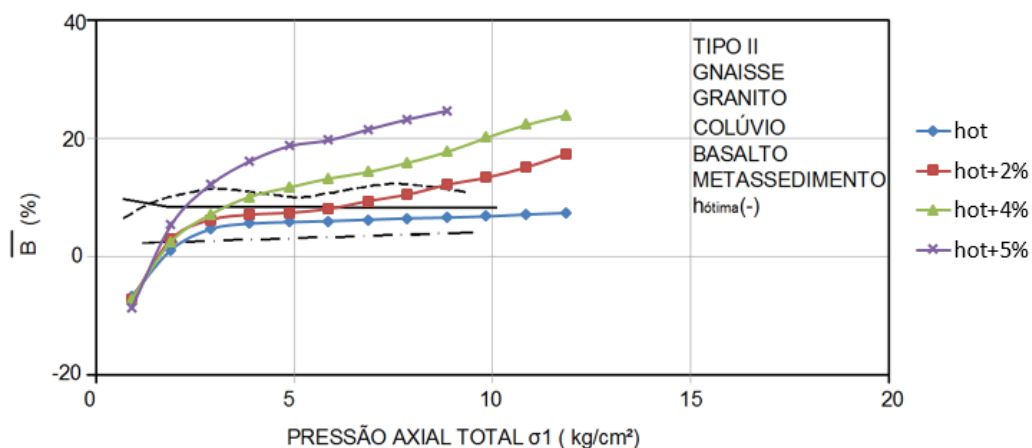


**Figura 97** - Comparação entre parâmetro de pressão neutra,  $\bar{B}$ , obtidos a partir de ensaios da amostra 5 com os retirados do livro de Cruz (1996). Nota:  $1\text{kg/cm}^2 \approx 100\text{ kPa}$ .



**Fonte:** Autora.

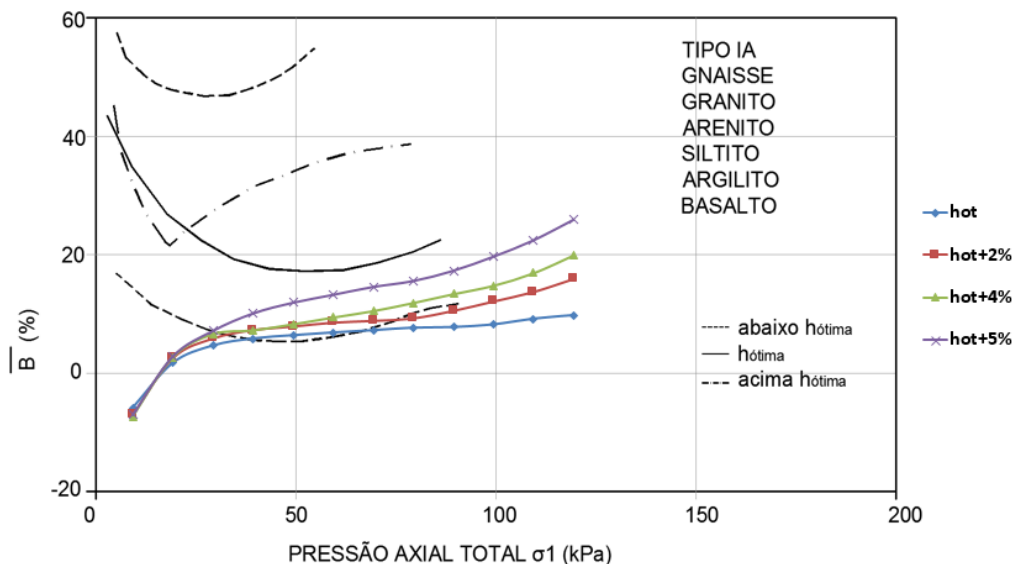
**Figura 98** - Comparação entre parâmetro de pressão neutra,  $\bar{B}$ , obtidos a partir de ensaios da amostra 6 com os retirados do livro de Cruz (1996). Nota:  $1\text{kg/cm}^2 \approx 100\text{ kPa}$ .



**Fonte:** Autora.

A Figura 99 mostra a comparação do parâmetro de pressão neutra,  $\bar{B}$ , obtido para a Amostra 7 (granito pouco milonitizado) com valores retirados de Cruz (1996) para solos do tipo IA.

**Figura 99** - Comparação entre parâmetro de pressão neutra,  $\bar{B}$ , obtidos a partir de ensaios da amostra 7 com os retirados do livro de Cruz (1996). Nota:  $1\text{kg/cm}^2 \approx 100\text{ kPa}$ .



**Fonte:** Autora.

Quando os valores de  $\bar{B}$  da amostra 7 são comparados com solos do tipo IA (Figura 99), observa-se que, apesar de terem litologias semelhantes, os valores são diferentes, para os mesmos desvios de umidade. Observa-se, na Tabela 3 (item 2.3.3) e na Tabela 6 (item 4.1), que as características destes solos são semelhantes.

#### 4.4.2 Módulo de deformabilidade tangente inicial, $E_i$

O módulo de deformabilidade tangente inicial,  $E_i$ , foi determinado a partir de ensaios triaxiais do tipo PN em amostras compactadas. Segundo Silveira (2006), ao utilizar o módulo de deformabilidade de ensaio triaxial PN para cálculo de recalques em aterros compactados, obtém-se valores de recalques mais próximos aos reais do que os valores de módulo de deformabilidade obtidos com ensaios triaxiais UU não saturado e CU saturado.

A Tabela 24 mostra os valores do módulo tangente inicial ( $E_i$ ) calculados para os ensaios triaxiais PN. Os maiores valores encontrados de módulo de deformabilidade tangente inicial foram para a metabásica (Amostra 5) e os menores, para o granito pouco milonitizado (Amostra 7). Os valores de  $E_{50}$  desta última amostra, obtidos através de ensaios UU e CU, indicaram também

menores valores quando comparados com os solos de outras litologias, como foi visto acima.

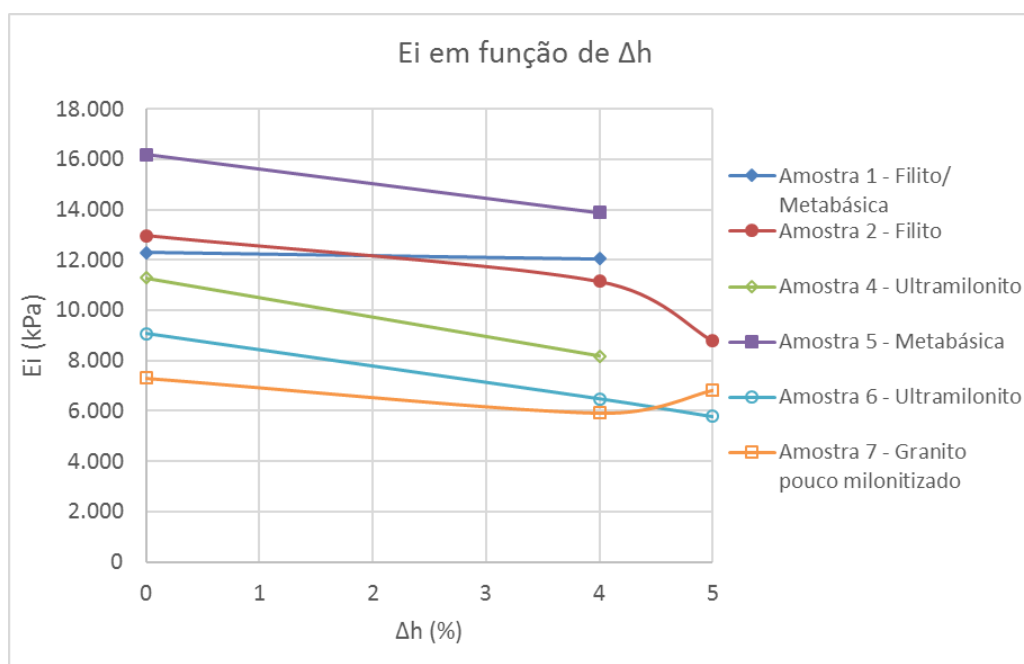
**Tabela 24** - Valores do módulo de deformabilidade tangente inicial.

Ei - Módulo de elasticidade tangente inicial (kPa)					
Amostra	Litologia	$\Delta h$ (%)			
		0	2	4	5
1	Filito/ Metabásica	12.302	13.751	12.046	-
2	Filito	12.970	11.514	11.145	8.787
4	Ultramilonito	11.292	9.489	8.183	-
5	Metabásica	16.185	17.012	13.879	-
6	Ultramilonito	9.066	7.664	6.488	5.784
7	Granito pouco milonitizado	7.297	5.483	5.932	6.828

**Fonte:** Autora.

A Figura 100 mostra o gráfico de  $E_i$  em função de  $\Delta h$ . Apesar de não haver uma tendência bem definida de variação, observa-se que os  $E_i$  decrescem ligeiramente em função de  $\Delta h$ . Ou seja, pode-se dizer que a deformabilidade cresce com o aumento do teor de umidade.

**Figura 100** – Módulo de deformabilidade tangente inicial em função do desvio de umidade em relação à umidade ótima.



**Fonte:** Autora.

Conforme apresentado no item 2.5.2, Massad et al. (1978) apresentaram alguns valores que permitem alguma comparação com os valores obtidos. No aterro úmido compactado no núcleo da Barragem do Rio Verde, próxima a Curitiba, com grau de compactação médio de 95% e desvios de umidade variando entre 0 e +6%; composto por solos de argilas siltosas ou silte argilosos, de decomposição de gnaiss migmatizado. Os módulos de deformabilidade secantes, estimados com base em deformações medidas entre placas de medidores de recalques telescópicos tipo IPT, variaram na faixa de 6.500 a 13.000 kPa, sendo, portanto da mesma ordem de grandeza dos valores obtidos de  $E_i$ .

#### 4.5 ENSAIOS DE ADENSAMENTO EDMÉTRICO

A Tabela 25 mostra os parâmetros obtidos a partir de ensaios de adensamento edométrico realizados com as amostras em estudo, variando o desvio de umidade de compactação em relação a umidade ótima. As curvas índice de vazios ( $e$ ) em função do log da tensão vertical efetiva ( $\log \sigma'_v$ ), com indicação destes parâmetros, estão apresentadas no Apêndice F.

**Tabela 25 – Parâmetros obtidos a partir do ensaio de adensamento edométrico.**

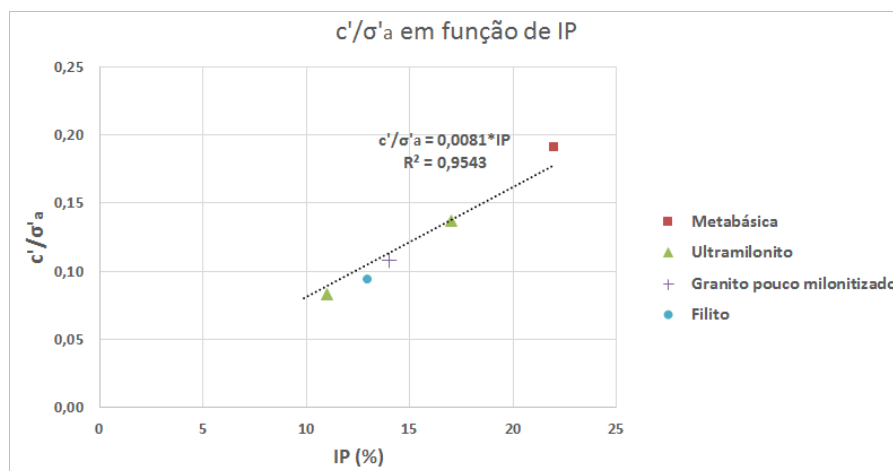
Amostra	Litologia	hótima				hótima + 2%				hótima + 4%			
		$e_0$	$C_c$	$C_R$	$\sigma'_a$ (kPa)	$e_0$	$C_c$	$C_R$	$\sigma'_a$ (kPa)	$e_0$	$C_c$	$C_R$	$\sigma'_a$ (kPa)
1	Filito/Metabásica	-				-				-			
2	Filito	0,76	0,16	0,01	400	0,77	0,16	0,01	380	0,77	0,20	0,01	410
3	Filito	-				-				-			
4	Ultramilonito	0,95	0,31	0,02	500	0,94	0,29	0,01	510	0,95	0,26	0,01	420
5	Metabásica	1,16	0,31	0,01	620	1,16	0,32	0,00	620	1,16	0,32	0,01	690
6	Ultramilonito	0,90	0,32	0,01	420	0,90	0,22	0,00	380	0,89	0,30	0,01	310
7	Granito pouco milonitizado	1,10	0,44	0,02	500	1,11	0,45	0,03	480	1,10	0,55	0,02	510

**Fonte:** Autora.

##### 4.5.1 Pressão de pré-adensamento

Como é possível observar, os maiores valores de tensão de pré-adensamento,  $\sigma'_a$ , foram da Amostra 5 (metabásica), variando de 620 a 690 kPa, com média de 643 kPa. Tal fato justificaria os valores elevados de coesão efetiva ( $c'$ ) desta amostra, obtidos de ensaios triaxiais UU não saturado. De fato, a Figura 101 mostra como a relação  $c'/\sigma'_a$  varia em função do índice de plasticidade, IP. O maior valor desta relação está associado à Amostra 5, com maior valor de IP.

**Figura 101** – Razão entre coesão efetiva,  $c'$ , e a tensão de pré adensamento,  $\sigma'_a$ , em função do índice de plasticidade, IP – Ensaio triaxial UU.

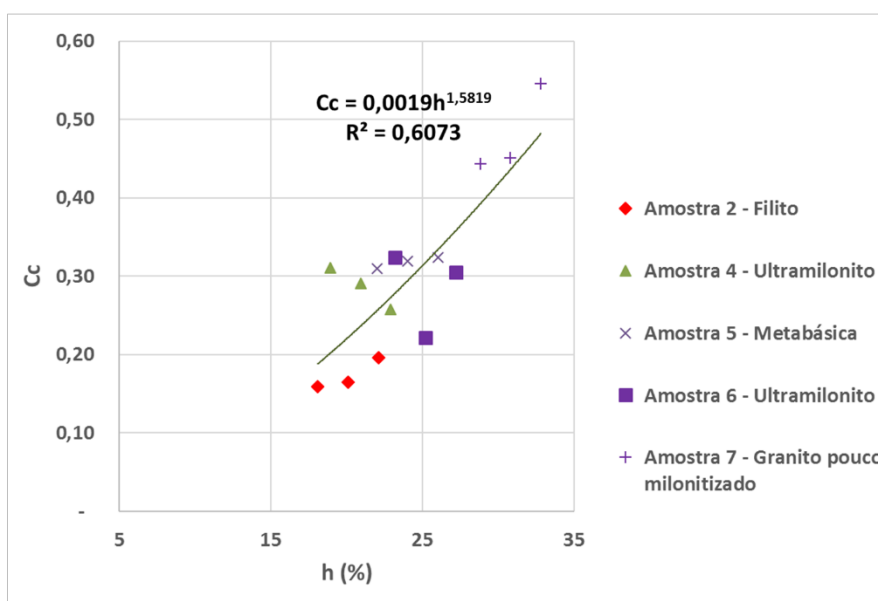


Fonte: Autora.

#### 4.5.2 Índice de compressão

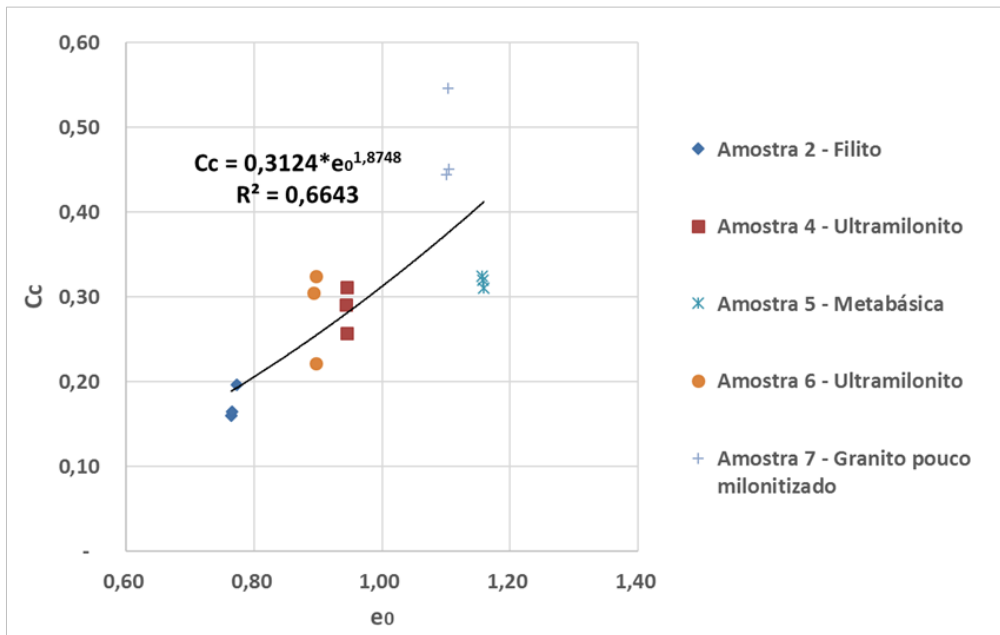
O índice de compressão ( $C_c$ ) variou de 0,16 (filito) a 0,55 da Amostra 7 (granito pouco milonitizado), que se revelou ser o mais compressível, confirmando as observações feitas sobre o  $E_{50}$  e o  $E_i$ . Segundo Dib (1985a e 1985b), pode-se usar correlações estatísticas entre o índice de compressão e o índice de vazios ( $e_0$ ) ou teor de umidade ( $h$ ). Os gráficos das Figura 102 e Figura 103 mostram estas correlações.

**Figura 102** – Gráfico índice de compressão ( $C_c$ ) versus teor de umidade ( $h$ ), em %.



Fonte: Autora.

**Figura 103** – Gráfico índice de compressão ( $C_c$ ) versus índice de vazios inicial ( $e_0$ ).



**Fonte:** Autora.

A seguir, é feita a comparação com valores de índice de compressão de outros solos residuais da bibliografia. Para isso, foram utilizados como referência os valores obtidos por Dib (1985b) para os solos residuais e saprolíticos da barragem de Tucuruí (AM), conforme visto na seção 2.5.1. As equações 27 e 28 mostram expressões obtidas por Dib em ensaios com amostras compactadas de solos residuais de metassedimentos.

**As** onde  $h$  em %.

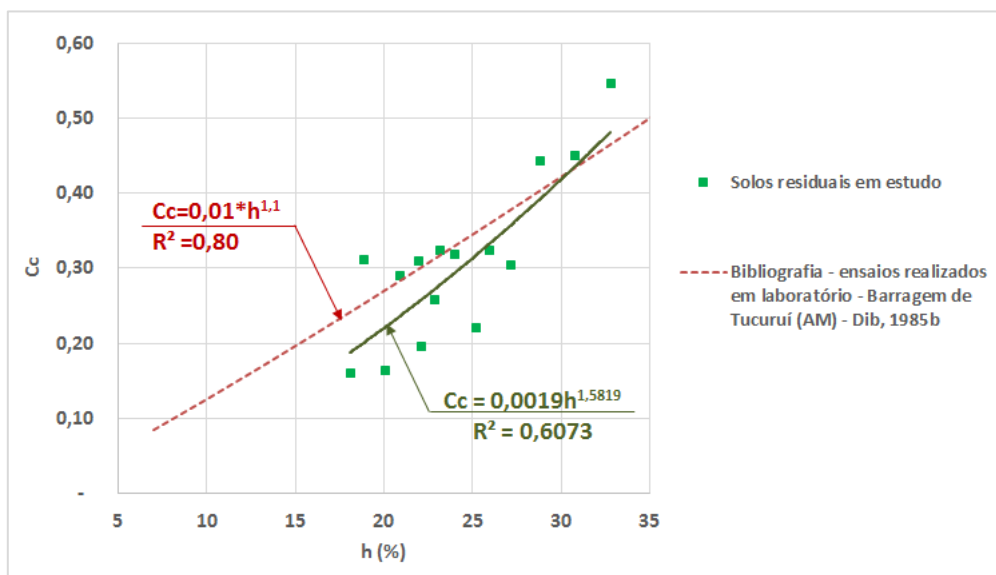
Figura 104 e Figura 105 mostram os valores de índice de compressão obtidos através dos ensaios de laboratório com as amostras 2, 4, 5, 6 e 7, comparados com os valores da bibliografia obtidos por Dib (1985b). Nota-se uma semelhança nas tendências de variações de  $C_c$  com  $h$  (em %). Foram também obtidas correlações, dadas pelas seguintes expressões:

$$C_c = 0,0019 * h^{1,5819}; R^2 = 0,61 \quad (41)$$

$$C_c = 0,3124 * e_0^{1,8748}; R^2 = 0,66 \quad (42)$$

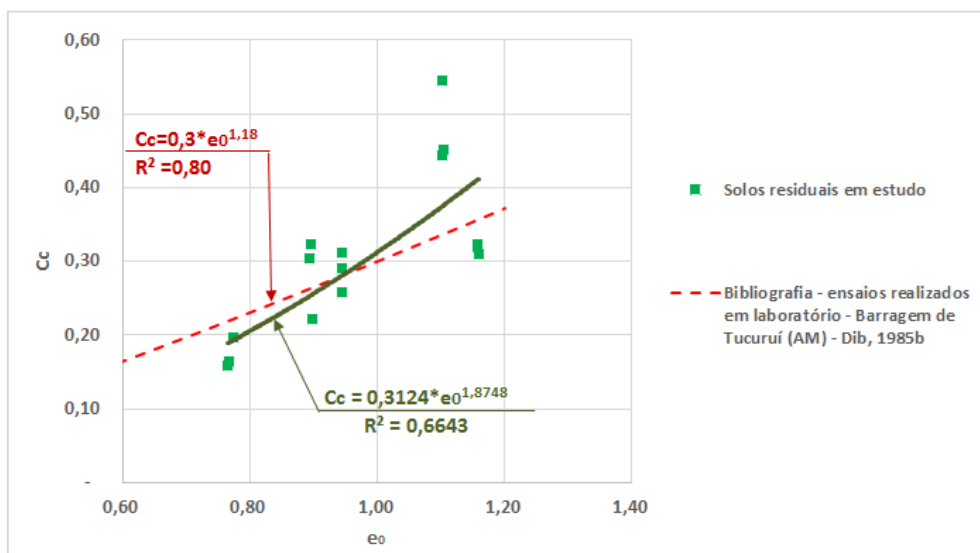
onde  $h$  em %.

**Figura 104** – Índice de compressão,  $C_c$ , versus teor de umidade,  $h$ , para todas as amostras, comparando com valores da bibliografia (Dib, 1985b).



**Fonte:** Autora.

**Figura 105** – Índice de compressão,  $C_c$ , versus índice de vazios,  $e_0$ , para todas as amostras, comparando com valores da bibliografia (Dib, 1985b).



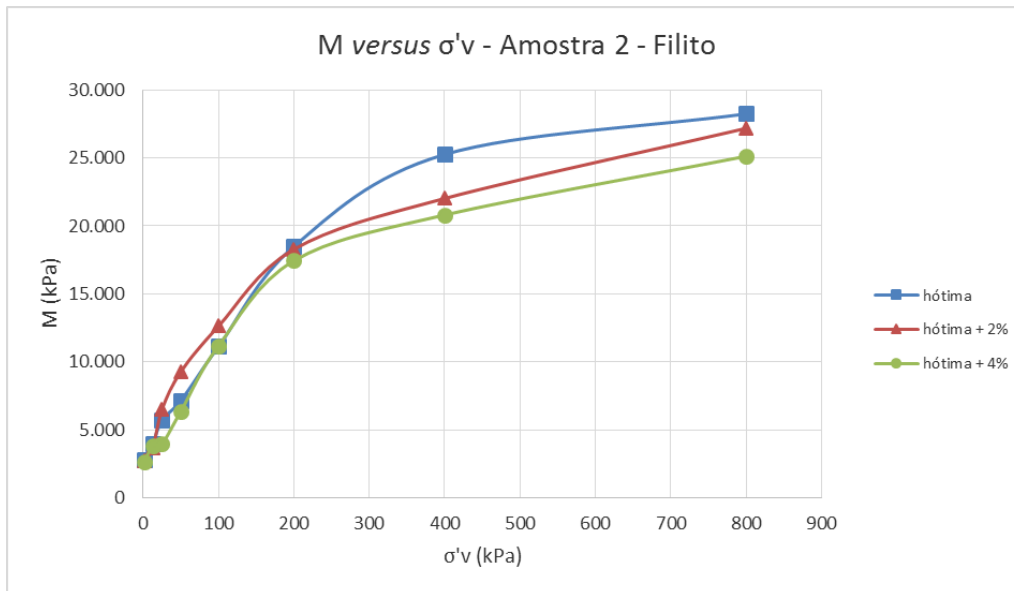
**Fonte:** Autora.

#### 4.5.3 Módulo de deformabilidade edométrico

A seguir, os gráficos das Figura 106 a Figura 110 mostram o módulo de deformabilidade edométrico,  $M$ , definido pela expressão (24), em função da

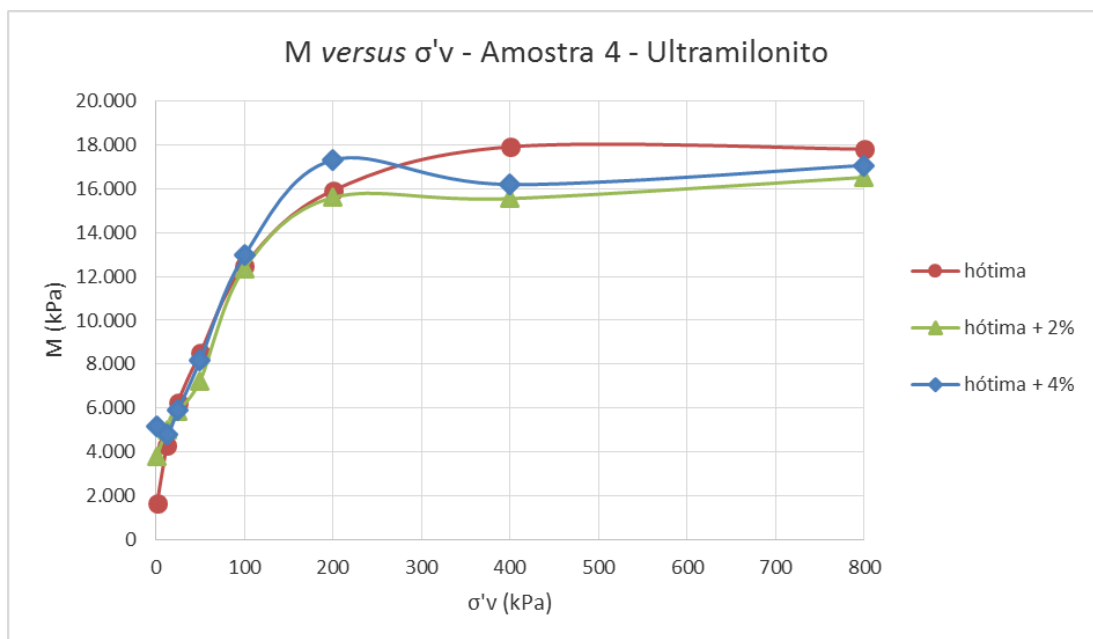
tensão efetiva vertical para os ensaios de adensamento realizados, variando o desvio de umidade em relação à umidade ótima.

**Figura 106** – Módulo de deformabilidade edométrico,  $M$ , em função da tensão vertical efetiva,  $\sigma'_v$  – Amostra 2 – Litologia: Filito.



**Fonte:** Autora.

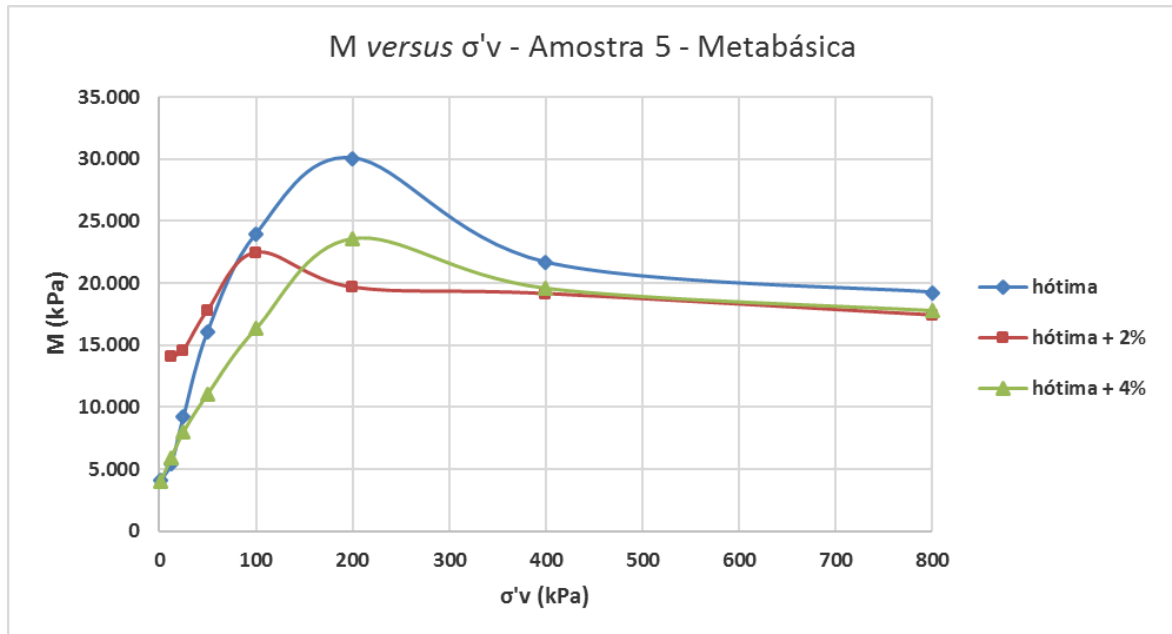
**Figura 107** – Módulo de deformabilidade edométrico,  $M$ , em função da tensão vertical efetiva,  $\sigma'_v$  – Amostra 4 – Litologia: Ultramilonito.



**Fonte:** Autora.

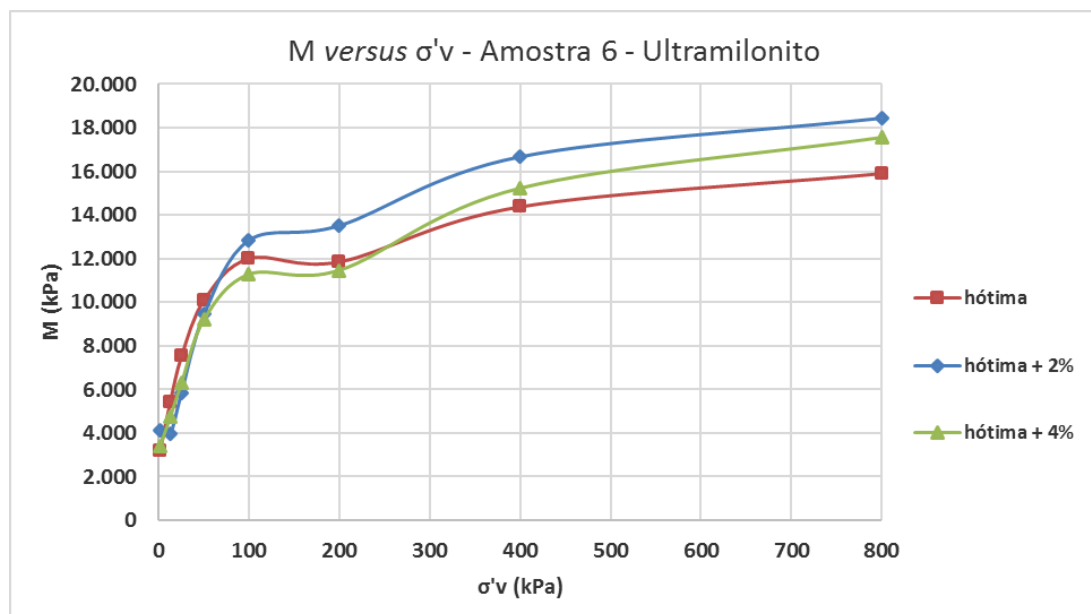


**Figura 108** – Módulo de deformabilidade edométrico,  $M$ , em função da tensão vertical efetiva,  $\sigma'_v$  – Amostra 5 – Litologia: Metabásica.



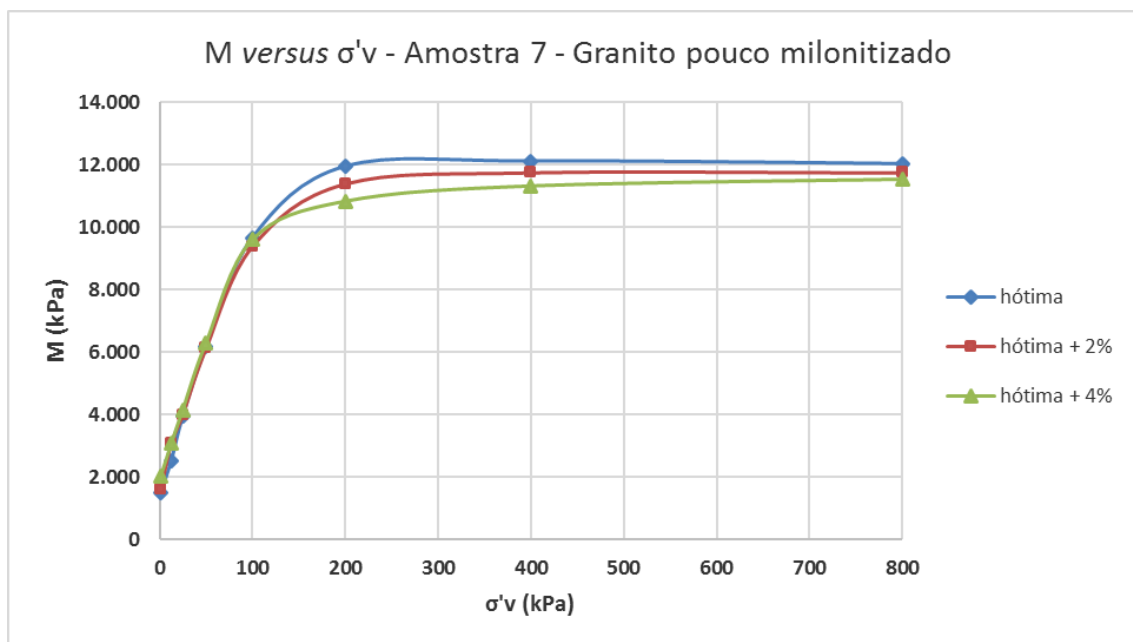
Fonte: Autora.

**Figura 109** – Módulo de deformabilidade edométrico,  $M$ , em função da tensão vertical efetiva,  $\sigma'_v$  – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito.



Fonte: Autora.

**Figura 110** – Módulo de deformabilidade edométrico,  $M$ , em função da tensão vertical efetiva,  $\sigma'_v$  – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado.



**Fonte:** Autora.

A partir dos gráficos das Figura 106 a Figura 110, observa-se que a ordem de grandeza dos valores para os diferentes desvios de umidade em relação à umidade ótima para uma mesma litologia é similar. A Tabela 26 mostra os valores máximos de  $M$  encontrados para cada litologia nos ensaios de adensamento edométrico. Como é possível observar, o valor máximo encontrado foi para a amostra 5 (metabásica) e, o menor, para a amostra 7 (granito pouco milonitizado), confirmando conclusões anteriores envolvendo o  $E_{50}$  e  $E_i$ .

**Tabela 26** – Valores máximos de  $M$ .

Ensaio	Litologia	$M$ (kPa)
1	Filito/Metabásica	-
2	Filito	25.000
3	Filito	-
4	Ultramilonito	18.000
5	Metabásica	30.000
6	Ultramilonito	18.000
7	Granito pouco milonitizado	12.000

**Fonte:** Autora.

#### 4.5.4 Parâmetros de expansibilidade

Inicialmente, durante a caracterização das amostras, foram realizados ensaios de difração raios X (DRX) para identificação dos minerais presentes. Entre os minerais presentes estão a muscovita, a caulinita e o quartzo. Nenhum destes corresponde ao grupo das esmectitas, portando, não apresentando potencial de expansão.

A partir deste fato, foram realizados ensaios de adensamento edométrico para medição da pressão de expansão. Para cada litologia ensaiada foram preparados três corpos de prova com grau de compactação de 95% do Proctor Normal e desvios de umidade de 0%, +3% e -3% do teor de umidade ótima. Os corpos de prova foram carregados com as pressões de 2,6 (equivalente à sobrecarga padrão do ensaio CBR), 10, 20 e 40 kPa e inundados. Após a estabilização da expansão, foram aplicadas pressões até um valor que anulou a expansão havida.

O ensaio permitiu determinar qual a sobrecarga necessária para compensar a expansão do solo. Foi, portanto, utilizado o primeiro método de obtenção da pressão de expansão apresentado no item 2.5.3, pois nos ensaios realizados foi possível obter um valor de pressão de expansão para cada ensaio.

O Apêndice G mostra os gráficos dos ensaios para cada amostra, junto com os valores de expansão obtidos nos ensaios CBR. A Tabela 27 mostra os valores de pressão de expansão obtidos e a máxima variação volumétrica de cada amostra.

**Tabela 27** - Resultados dos ensaios de adensamento edométricos – pressão de expansão e máxima variação volumétrica de cada amostra.

Amostra	Litologia	Pressão de inundação (kPa)	Pressão de expansão (kPa)			Máxima variação volumétrica		
			hot - 3%	hot	hot + 3%	hot - 3%	hot	hot + 3%
1	Filito/Metabásica	10	38	34	-	0,72%	0,49%	-
		20	35	35	-	0,24%	0,16%	-
		40	48	45	-	0,10%	0,06%	-
2	Filito	2,6	-	52	-	-	3,17%	-
		10	73	64	38	1,00%	0,88%	0,66%
		20	55	50	36	0,28%	0,20%	0,12%
		40	48	51	43	0,05%	0,01%	0,07%
3	Filito	2,6	-	29	-	-	1,54%	-
		10	26	20	23	0,51%	0,43%	0,26%
		20	32	29	28	0,17%	0,16%	0,11%
		40	42	41	41	0,05%	0,04%	0,02%
4	Ultramilonito	10	110	-	-	2,82%	-	-
		20	90	-	-	1,28%	-	-
		40	70	-	-	0,50%	-	-
6	Ultramilonito	2,6	-	53	-	-	5,03%	-
		10	66	62	64	1,80%	1,67%	1,57%
		20	54	44	60	1,04%	0,56%	0,50%
		40	56	49	58	0,37%	0,19%	0,21%
7	Granito pouco milonitizado	2,6	-	72	-	-	4,60%	-
		10	61	51	41	1,55%	0,76%	1,02%
		20	58	52	46	0,86%	0,47%	0,51%
		40	70	62	48	0,21%	0,14%	0,15%

**Fonte:** Autora.

Observa-se que as maiores variações volumétricas estão associadas à pressão de inundação de 2,6kPa (equivalente à sobrecarga padrão do CBR), com valor máximo de 5,03%, para o caso dos ultramilonitos. Nesse sentido, para a pressão de inundação de 10kPa, foram obtidos valores de expansão de 1,80% e 2,82% para os ultramilonitos, com um desvio de umidade máximo de -3%. No caso dos filitos, as expansões limitaram-se a 1% e, no dos granitos, a 1,55%.

A partir disso, é possível concluir que, em geral, são necessárias pressões inferiores a 10kPa para reduzir a expansão dos materiais para valores inferiores a 2%, ou seja, seria necessário apenas meio metro (0,5m) de espessura de capa de envelopamento com solo laterítico para reduzir a expansão para o valor limite.

Com relação a valores encontrados na bibliografia, Júnior (2006) apresentou resultados para solos de decomposição de filito localizado na Baixada Cuiabana, a qual é formada geologicamente pelo grupo Cuiabá, constituída por duas principais formações geológicas: a formação Miguel Sutil, com predominância argilo-siltosa, estratificações plano-paralelas e clivagem ardósiana; e a formação Coxipó, mais arenosa, formada principalmente por

meta-conglomerados. O valor do limite de liquidez (LL) deste solo é 44% e o índice de plasticidade (IP) igual a 22%. O valor da pressão de expansão é igual a 25 kPa e a máxima variação volumétrica é igual a 15%. Como é possível observar na Tabela 27, este valor de 15% é muito maior que os 3,17% da Amostra 2 (Filito), na umidade ótima. Já o valor de 25 kPa de pressão de expansão é consistente com a faixa de variação de 20 a 49 kPa da Amostra 3 (Filito) na umidade ótima.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo a descrição e caracterização dos solos utilizados em alguns aterros compactados, constituído por solos residuais de litologias diversas, pertencentes ao Rodoanel Mário Covas de São Paulo. Foram realizados ensaios de caracterização, ensaios triaxiais UU não saturado, CU saturado e PN e ensaios de adensamento edométrico em amostras compactadas. A análise foi separada por litologia, comparando os resultados com a literatura técnica, com solos de origem semelhante.

Além disso, devido à expansão de obras de infraestrutura para regiões periféricas de São Paulo, os resultados obtidos nesta dissertação podem ser utilizados como valores de referência em outros projetos e pesquisas, em regiões próximas ou que venham a utilizar materiais de mesma origem e/ou litologia.

No total, foram realizados ensaios em sete amostras, sendo duas de Filito, uma de Granito Milonitizado, uma de Metabásica, duas de Ultramilonito e uma de Filito/Metabásica. As profundidades de retirada dos blocos variaram de 0 a 10 m.

### 5.1 CARACTERÍSTICAS DE IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

Uma avaliação tátil-visual mostrou que estes solos possuem textura basicamente siltosa, variando entre arenoso e argiloso. Tal fato foi comprovado pelos ensaios de caracterização, os quais mostraram que há predominância da fração de silte em todas as amostras, variando de, aproximadamente, 64% a 82%, seguida pela fração de argila, variando de, aproximadamente, 2% a 17%.

O limite de liquidez das amostras variou de 35% a 55% e o de limite de plasticidade de 10% a 22%. A umidade ótima média variou de 18,1% a 23,2% e a massa específica seca máxima varia de 13,7 a 16,7 kN/m<sup>3</sup>.

Os solos 2, 3, 4 e 6 encontram-se sobre a linha A da classificação do solo na Carta de Plasticidade de Casagrande, ou seja, estão entre o limite de serem classificados como CL (argilas inorgânicas de baixa plasticidade) e ML (siltes inorgânicos de baixa plasticidade). O solo 1 pode ser classificado como uma argila inorgânica de baixa plasticidade. Já os solos 5 e 7 são classificados como

MH (siltes inorgânicos de alta plasticidade), uma vez que apresentam o valor do limite de liquidez (LL) maior que 50%.

## **5.2 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO**

Foram também analisados os ensaios de compactação, comparando com a hipérbole de Kuczinski, juntamente com a variação de  $\pm 0,5$  kN/m<sup>3</sup>. Foi observado que as amostras 1, 4 e 5 não estão dentro do limite. Como foi observado por Cruz et al. (1982-1985), alguns solos siltosos, como os solos em estudo, podem apresentar peso específico máximo menor que o obtido pela hipérbole de Kuczinski, o que justificaria o fato de alguns valores estarem fora do limite de 0,5 kN/m<sup>3</sup>.

## **5.3 ENSAIOS TRIAXIAIS CU SATURADO E UU NÃO SATURADO**

### **5.3.1 Parâmetros de resistência**

Foram obtidos os valores dos parâmetros de resistência efetivos e totais a partir de ensaios triaxiais UU não saturado e CU saturado, para corpos de prova de amostras compactadas na umidade ótima, 2% acima e 4% acima, mantendo o grau de compactação em torno de 95%. De maneira geral, observou-se que os valores de coesão obtidos a partir de ensaios, considerando todas as litologias, tem grande variação: de 21 a 130 kPa para não saturados e de 14 a 26 kPa para solos saturados. Para os valores de coesão da bibliografia também se observou grande variação: nas litologias listadas, com coesão para solos não saturados variando de 0 a 90 kPa, enquanto para solos saturados variando de 0 a 73 kPa. Assim, concluiu-se que pode haver uma variação grande do valor da coesão para solos residuais compactados.

Observou-se também que a Amostra 5 (metabásica) apresentou os maiores valores de coesão efetiva, da ordem de 130 kPa, enquanto nas demais amostras esta coesão efetiva variou de 21 a 68 kPa. Isto se deve ao fato dessa amostra apresentar elevada tensão de pré-adensamento e maior valor do IP.

Já para tensões intermediárias os ângulos de atrito obtidos nos ensaios são muito próximos aos valores da bibliografia para ensaios em solos não saturados (UU) e em solos saturados (CU) compactados.

Observou-se que a resistência em termos de tensões efetivas (coesão efetiva) é praticamente invariante em relação aos desvios de umidade em relação à ótima. A análise foi feita adotando um ângulo de atrito médio para os três desvios de umidade e determinando as correspondentes coesões efetivas, que se mantiveram praticamente constantes para solos de mesma litologia, para ensaios em solos não saturados (UU) e em solos saturados (CU) compactados. Trata-se de confirmação de resultados divulgados na literatura técnica, que mostram que essa resistência é função do grau de compactação, mantido em torno dos 95% no presente estudo.

### 5.3.2 Módulo de deformabilidade, $E_{50}$

A determinação do parâmetro de deformabilidade é essencial na estimativa de recalques na fase operacional dos aterros rodoviários. Para os ensaios triaxiais UU não saturado e CU saturado foram obtidos os valores de módulo de deformabilidade secante, passando pela origem e pelo valor de 50% da tensão na ruptura, para todos os desvios de umidade em relação à umidade ótima ( $\Delta h$ ).

Para os ensaios triaxiais UU não saturado os maiores valores de  $E_{50}$  foram para a amostra 5 (metabásica), e os menores para a amostra 7 (granito pouco milonitizado). Já para os ensaios triaxiais CU saturado foram para a amostra 2 (filito) e os menores valores, para ultramilonito (amostra 6).

Também foram obtidas correlações numéricas para o módulo  $E_{50}$ , em função da tensão confinante ( $\sigma_3$ ), separadas por litologia, para os ensaios CU saturado e UU saturado. Em média, considerando o universo de todas as litologias, obteve-se  $E_{50}=0,3*\sigma_3^{0,80}$  ( $\sigma_3$  em kPa e  $E_{50}$  em MPa) onde para os ensaios Triaxiais CU; para os ensaios Triaxiais UU, também foram obtidas correlações desse tipo, sem que fosse possível definir uma média global, envolvendo todas as litologias.

Além disso, foi observado que a razão entre o módulo  $E_{50}$  obtidos nos ensaios triaxiais UU não drenado e a resistência drenada do solo ( $c=0,5*(\sigma_1-\sigma_3)$ ) é praticamente constante para todos os ensaios, quando separados por litologia. Observou-se que os menores valores de  $E_{50}/c$  obtidos foram para o granito pouco milonitizado, sendo a média dos valores da ordem de 71. Já para as



demais amostras, a média encontrada foi de 95 para o filito, 88 para o ultramilonito e 87 para a metabásica. A média global, envolvendo todas as litologias, foi de cerca de 85.

#### 5.4 ENSAIOS TRIAXIAIS PN

A partir dos ensaios triaxiais PN, executados com  $k = \sigma_3 / \sigma_1 = 0,5$ , foi possível determinar o parâmetro de pressão neutra,  $\bar{B}$ , e o módulo de deformabilidade tangente inicial,  $E_i$ .

##### 5.4.1 Parâmetro de pressão neutra, $\bar{B}$

Nos ensaios a tensão principal maior ( $\sigma_1$ ) variou entre 0 e 1.200 kPa, a fim de simular as condições de alteamento dos aterros da obra em estudo. Com baixos carregamentos, até aproximadamente 200 kPa, os valores de  $\bar{B}$  de todas as amostras ensaiadas foram negativos, e praticamente convergentes para um mesmo ponto, fato atribuído aos baixos graus de saturação dos corpos de prova, variando de 56 a 84% para  $\Delta h = 0$  a até 4% e mesmo 5%. Conjecturou-se que o ar presente nos vazios estivesse na pressão atmosférica, pois para solos com baixo grau de saturação, os poros preenchidos por ar são intercomunicantes (Pacheco Silva, 1972).

Para tensões elevadas ( $\sigma_1 = 1.000 \text{ kPa}$ ), o  $\bar{B}$  pode variar de 2% a 21%. Os menores valores (2 a 4%) referem-se à amostra 5 (metabásica) e os maiores (8 a 21%), às amostras 6 (ultramilonitos) e 7 (granito pouco milonitizado).

Os valores de  $\bar{B}$  das amostras de filito (1 e 2) foram comparadas com solos de mesma litologia (Juqueri Cinza, Juqueri A e Filito E. O.) e solos de gnaiss, ambos apresentados por Cruz (1967) e Cruz (1996). Os valores obtidos na presente pesquisa foram inferiores ou muito próximos aos de Cruz (1967). A exceção ficou por conta da amostra 2, com valores iguais (na  $h_{ot}$ ) ou superiores ( $\Delta h = 2\%$ , 4% e 5%) aos da bibliografia.

Com as amostras 4, 5, 6 e 7 foram realizadas comparações com valores apresentados por Cruz (1996), a saber, solos do tipo IA (gnaiss, granito, arenito, siltito, argilito e basalto) e solos do tipo II (gnaiss, granito, colúvio, basalto e metassedimento). Observou-se que os parâmetros  $\bar{B}$  obtidos nessa pesquisa estão relativamente próximos aos valores da bibliografia para corpos de prova

moldados na umidade ótima. Além disso, observa-se que para tensões axiais baixas, da ordem de 0 a 200 kPa, os valores de  $\bar{B}$  obtidos são menores que 0%, devido ao aumento da pressão de sucção.

A amostra 7, apesar de ter litologia semelhante à dos solos do tipo IA de Cruz (1996), os valores de  $\bar{B}$  são diferentes para os diversos desvios de umidade.

#### **5.4.2 Módulo de deformabilidade tangente inicial, $E_i$**

Os  $E_i$  variaram, grosso modo, entre 6.000 e 16.000 kPa, sem distinção de litologia. Os maiores valores encontrados foram para a metabásica (Amostra 5), da ordem dos 16.000 kPa, e os menores, para o granito pouco milonitizado (Amostra 7), da ordem dos 6.000 kPa. Os valores de  $E_{50}$  desta amostra, obtidos através de ensaios UU e CU, indicaram também menores valores quando comparados com os solos de outras litologias, como foi visto acima.

Os módulos de deformabilidade secantes, apresentados por Massad et al. (1978) para Barragem do Rio Verde ( $GC=95\%$  e  $0\% \leq \Delta h \leq 6\%$ ) para solos de argilas siltosas ou silte argilosos, de decomposição de gnaiss migmatizado, estimados com base em deformações medidas entre placas de medidores de recalques telescópicos tipo IPT, variaram na faixa de 6.500 a 13.000 kPa, sendo, portanto da mesma ordem de grandeza dos valores obtidos de  $E_i$  obtidos.

### **5.5 ENSAIOS DE ADENSAMENTO**

Já com os ensaios de adensamento realizados com as amostras, foram obtidos alguns parâmetros, entre eles:

- Coeficiente de compressibilidade ( $a_v$ );
- Coeficiente de compressibilidade volumétrica ( $m_v$ );
- Módulo de deformabilidade edométrico ( $M$ );
- Tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_a$ );
- Índice de compressão ( $C_c$ );
- Índice de recompressão ( $C_r$ ); e
- Expansibilidade.

O índice de compressão ( $C_c$ ) variou de 0,16 (filito) a 0,55 (amostra 7, granito pouco milonitizado), que se revelou ser o mais compressível, confirmando as observações feitas sobre o  $E_{50}$  e o  $E_i$ . Foram também obtidas correlações estatísticas entre o índice de compressão e o índice de vazios ( $e_0$ ) ou teor de umidade ( $h$ , em %):  $C_c=0,0019 \cdot h^{1,5819}$  e  $C_c=0,3124 \cdot e_0^{1,8748}$  ( $h$  em %), com tendências de variação semelhantes às obtidas por Dib (1985b) em solos residuais de metassedimentos.

Além disso, com relação ao módulo de deformabilidade edométrico,  $M$ , o valor máximo encontrado foi para a amostra 5 (metabásica), da ordem de 30.000 kPa, e, o menor, para a amostra 7 (granito pouco milonitizado), da ordem de 12.000 kPa, confirmando conclusões anteriores envolvendo o  $E_{50}$  e  $E_i$ .

Com relação à expansibilidade, nas análises dos ensaios de difração raios X (DRX) para identificação dos minerais presentes, se observou que os minerais presentes eram a muscovita, a caulinita e o quartzo. Nenhum destes corresponde ao grupo das esmectitas, portando, não apresentando potencial de expansão.

Os ensaios de adensamento edométrico foram realizados para determinar a pressão de expansão, carregados com pressões de 2,6, 10, 20 e 40 kPa e inundados, variando o desvio de umidade em relação a ótima de 0%, +3% e -3%. O ensaio permitiu determinar qual a sobrecarga necessária para compensar a expansão do solo.

A partir disso, foi possível concluir que, em geral, são necessárias pressões inferiores a 10kPa para reduzir a expansão dos materiais para valores inferiores a 2%, ou seja, seria necessário apenas meio metro (0,5m) de espessura de capa de envelopamento com solo laterítico para reduzir a expansão para o valor limite.

Os valores de pressão de expansão e máxima variação volumétrica do filito foram comparados com valores de solos de filito da Baixada Cuiabana apresentados por Júnior (2006). Como foi possível observar, o valor da bibliografia de máxima variação volumétrica (15%) é muito maior que o valor de 3,17% para Amostra 2 (Filito) na umidade ótima, enquanto o valor de pressão de

expansão da bibliografia (25 kPa) é consistente com os valores obtidos para a Amostra 3 (filito), também na umidade ótima, os quais variaram de 20 a 49 kPa.

## **5.6 PROPOSTA PARA FUTURAS PESQUISAS**

Como já foi dito anteriormente, a importância do estudo de solos residuais se dá ao fato de que os resultados e análises obtidos podem ser utilizados como valores referenciais em outros projetos e pesquisas, em regiões próximas ou que venham a utilizar materiais de mesma origem e/ou litologia.

Em regiões do Pré-Cambriano, região do Rodoanel Norte e da qual foram estudadas as amostras de solo deste trabalho, ocorrem solos residuais de micaxistos, granitos e gnaisses. Assim, devido à expansão de obras de infraestrutura para regiões periféricas de São Paulo, sugere-se que este estudo seja complementado com outras amostras de solos residuais compactados, de mesma ou de outras litologias.

Além disso, sugere-se que seja feita a análise dos dados de instrumentação de aterros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

\_\_\_\_\_. **NBR 6457**: Preparação de amostras de solo para ensaio normal de compactação e ensaios de caracterização – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solos – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182**: Ensaio de Compactação, 1986

\_\_\_\_\_. **NBR 12007**: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1990.

Confins. Acesso em 27 de abril de 2017, disponível em Revista Franco-Brasileira de Geografia: <https://confins.revues.org/6168?lang=pt>.

CRUZ, P. T. da, **Propriedades de engenharia de solos residuais compactados da Região Centro-Sul do Brasil**. THEMAG/ DLP/ EPUSP, 1967.

CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras: Casos históricos, materiais de construção, projeto**. 1996.

CRUZ, P. T. da, MAIOLINO, A. L. G. **Peculiarities of geotechnical behavior of tropical lateritic and saprolitic soils**. In: Peculiarities of saprolitic soils. Process Report. ABMS. Committee on tropical soils of the ISSMFE, 1982-1985.

CRUZ, P. T. da, MAIOLINO, A. L. G. **Materiais de construção**. *Anais do Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto do Paraná*, São Paulo, ABMS/ABGE/CBMR, 1983.

CRUZ, P. T. da, FERREIRA, R. C. **Aterros Compactados**. In: Solos do Interior de São Paulo – Mesa Redonda. ABMS/Escola de Engenharia de São Carlos, 1993.

CRUZ, Paulo T da; MASSAD, F. **O parâmetro B em Solos Compactados**. In: Anais do III Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Belo Horizonte, Anais, vol. I, pp. I a I24., 1966, Belo Horizonte.

DEERE, D. U.; PATTON, F. D. **Slope stability in residual soils**. In: Fourth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Juan, Puerto Rico, American Society of Civil Engineers, New York, pp. 97-170, 1971.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. ET-DE-Q00/003. **Aterros**. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNER ES 282. **Terraplenagem – Aterros**. Rio de Janeiro, 1997.

DIB, P. S. **Compressibility characteristics of tropical soils making up the foundation of Tucuruí dam**. Proceedings of the first Internacional conference of Geomechanics in Tropical, Lateritic and Saprolitic soils. ABMS. Committee on Tropical Soils of the ISSMFE. Brasília, 1985a.

DIB, P. S.; ONO, S. **Compressibilities of the soils used in the construction of the Tucuruí dam - Amazonas Brazil**. Proceedings of the first Internacional conference of Geomechanics in Tropical, Lateritic and Saprolitic soils. ABMS. Committee on Tropical Soils of the ISSMFE. Brasília, 1985b.

DUNCAN, J.M.; WRIGHT, S.G. **Soil Strength and Slope Stability**. John Wiley and Sons Inc., pp. 19-30, 2005.

EMPLASA. **Carta Geológica da Região Metropolitana da Grande São Paulo**. (Escala 1:100.000), 1980.

Folha de São Paulo. Acesso em 8 de julho de 2016, disponível em Folha de São Paulo: <http://www1.folha.uol.com.br/poder/2016/05/1776173-dersa-usa-so-parecer-da-oas-para-aumentar-custo-de-obra.shtml>.

HILF, J. W. **Compacted Fill**. Chapter 7 of the "Foundation Engineering Handbook". P. 244-311, Ed. By H.F. Winterkorn and H-Y Fang. Van Nostrand Reinhold Co. New York, 1975.

JÚNIOR, I. R.; FUTAI, M.; CONCIANI, W. **Estudo de uma solução para projeto de fundações em solos expansivos**. XIII Cobramseg. Curitiba, 2006.

LAMBE, T. W. **Soil Testing for engineers**. New York: John Wiley & Sons, 1951.

LAMBE, T. W., & Whitman, R. V. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1969

MAIOLINO, A. L. G. **Resistência ao cisalhamento de solos compactados: uma proposta de tipificação**. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1985.

MARIANA Y. Comunicação pessoal, 2017.

MASSAD, F. **Ruptura Hidráulica de Aterros Compactados durante a execução de ensaios de permeabilidade "in situ"**. In: VIIIº Seminário Nacional de Grandes Barragens; São Paulo 1972.

MASSAD, F., MASSAD, E., YASSUDA, A. J. **Análise do Comportamento da Barragem do Rio Verde através de Instrumentos de Auscultação**. In: XII Seminário Nacional de Grandes Barragens, S. Paulo, v.1. p.63 – 84, 1978.

MASSAD, F. **Obras de Terra – Curso Básico de Geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

MASSAD, F. **Notas de Aula - Mecânica dos Solos Experimental**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.

MASSAD, F. **Mecânica dos solos experimental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

MELLO, V. F. **Reflections on Design Decisions of Practical Significance to Embankment Dams**. . Em *Geotechnique* (p. 17th Rankine Lecture), 1977

PACHECO SILVA, F. Neutral Pressure in Compacted Cohesive Soils. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, ASCE, SM1, p. 105-119, jan. 1966. **Publicação IPT n. 794**, 1966.

PACHECO SILVA, F. Poro-pressões e recalques em Barragens de terra. In: **Seminário Nacional de Grandes Barragens**, 8, tema 3, v. 2, p. 8, São Paulo, 1972. **Publicação IPT n. 982**, 1972.

PINTO, C.S. **Resistência ao cisalhamento dos solos**. São Paulo: Grêmio Politécnico, 1979.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos – Em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SANTOS, N. B.; MARINHO, F. **Características geotécnicas de solos expansivos compactado**. 6º CBGE/IX COBRAMSEF. São Paulo, 1990.

SEED, H. B.; CHAN, e. C. **Undrained Strength Characteristics of clays**. Journal da ASCE, 1959.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento**. São Paulo, Oficina de Textos, 2006.

SOARES, V. **Utilização de mistura de solo saprolítico com bentonita na construção de revestimento de fundo de aterros sanitários**. Dissertação de mestrado. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2012.

SP Turismo. Acesso em 12 de julho de 2015, disponível em SP Turismo: <http://www.sp-turismo.com/mapa.htm>.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. T.; TOLEDO, M. C. M.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. Companhia Editora Nacional. São Paulo, 2009.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. McGraw Hill. São Paulo, 1977.

YODER, E. J. **Principles of pavement design**. New York: 1st edition, John Wiley & Sons, página 229, 1959.

YODER, E. J. **Principles of pavement design**. New York: 2nd edition, John Wiley & Sons, 1975.

## ANEXO A

As Figura 112 a Figura 117 apresentam as envoltórias de resistência de Maiolino (1985) indicando os tipos de ensaios triaxiais que foram realizados para obter os parâmetros de resistência. A simbologia utilizada está na Figura 111, salvo quando indicado.

**Figura 111 – Simbologia utilizada.**

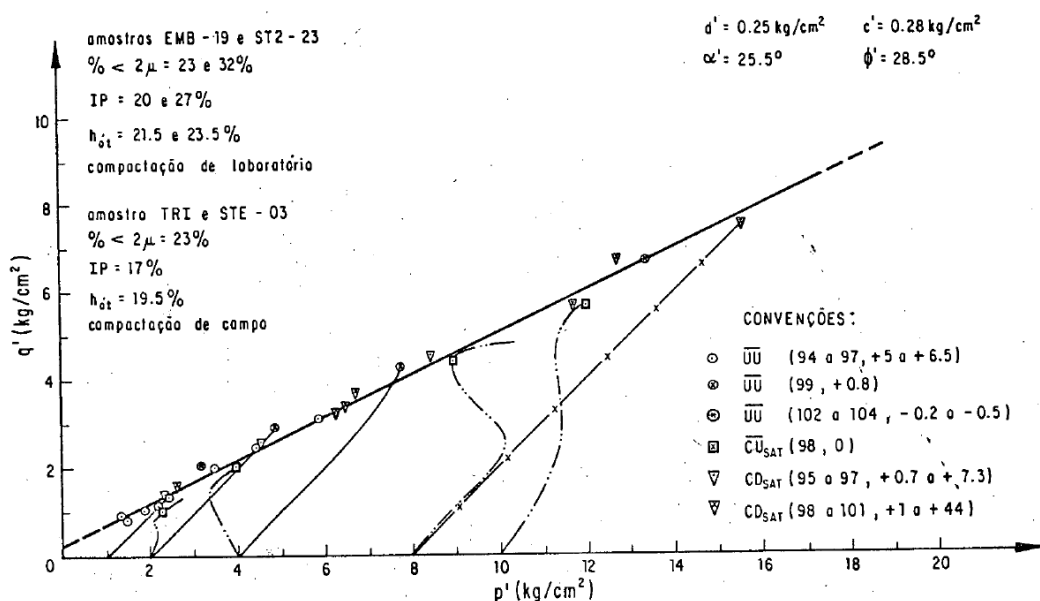
ENSAIO	GC < 98 %			GC ≥ 98 %		
	$\Delta h < 0$	$\Delta h \approx 0$	$\Delta h > 0$	$\Delta h < 0$	$\Delta h \approx 0$	$\Delta h > 0$
$\bar{U}U$	○	○	●	⊙	⊙	⊙
$\bar{C}U$	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖
$\bar{C}U_{SAT}$	⊠	⊠	⊠	⊠	⊠	⊠
CD	△	△	△	△	△	△
$CD_{SAT}$	▽	▽	▽	▽	▽	▽

TRAJETÓRIAS DE TENSÕES EFETIVAS

————— ensaios  $\bar{U}U$   
 - - - - - ensaios  $\bar{C}U$   
 - · - · - ensaios  $\bar{C}U_{SAT}$   
 - x - x - ensaios CD e  $CD_{SAT}$

Fonte: Maiolino (1985).

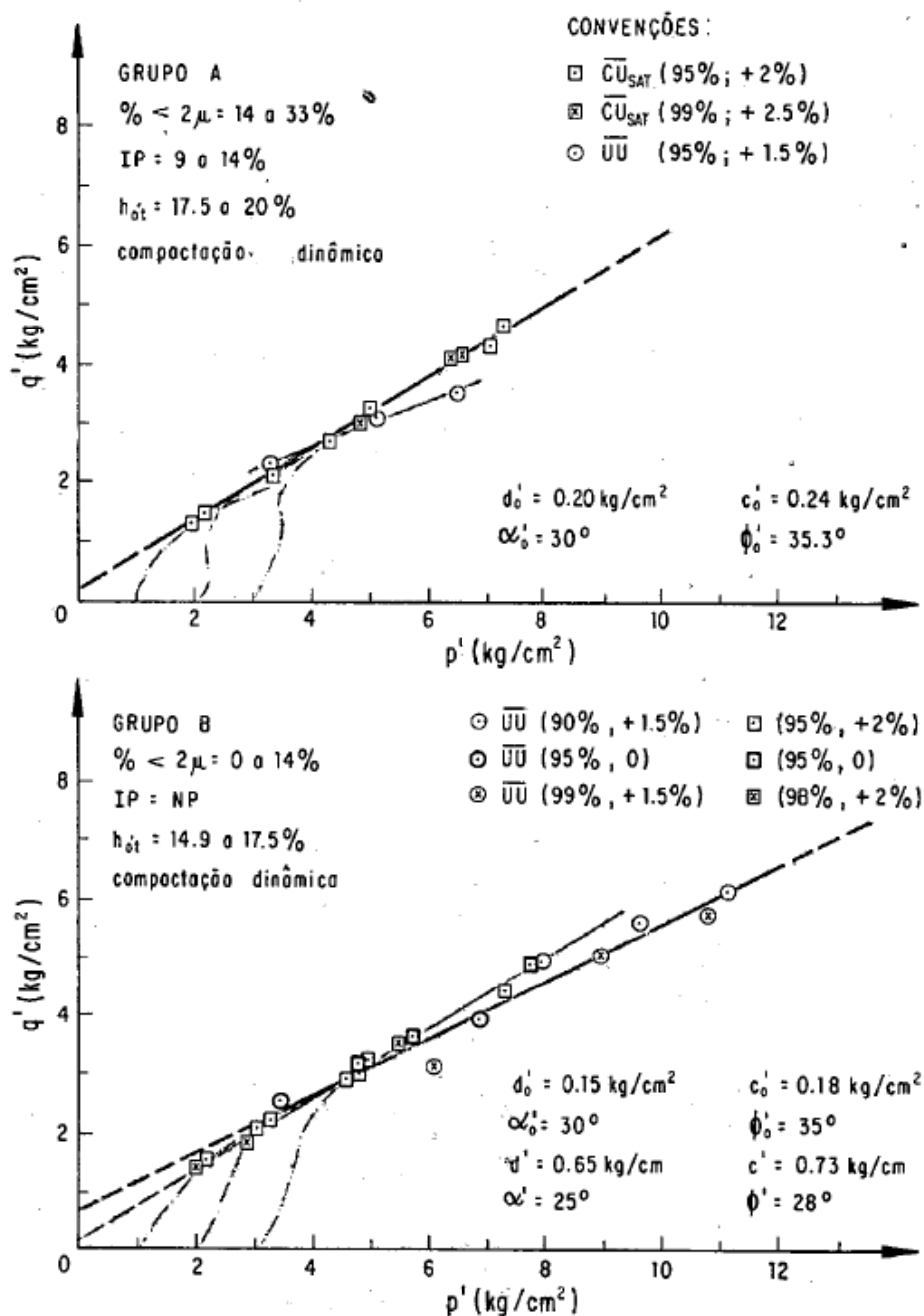
**Figura 112 – Envoltória modificada de resistência – Solo saprolítico de Metassedimento – Tucuruí.**



Fonte: Maiolino (1985).

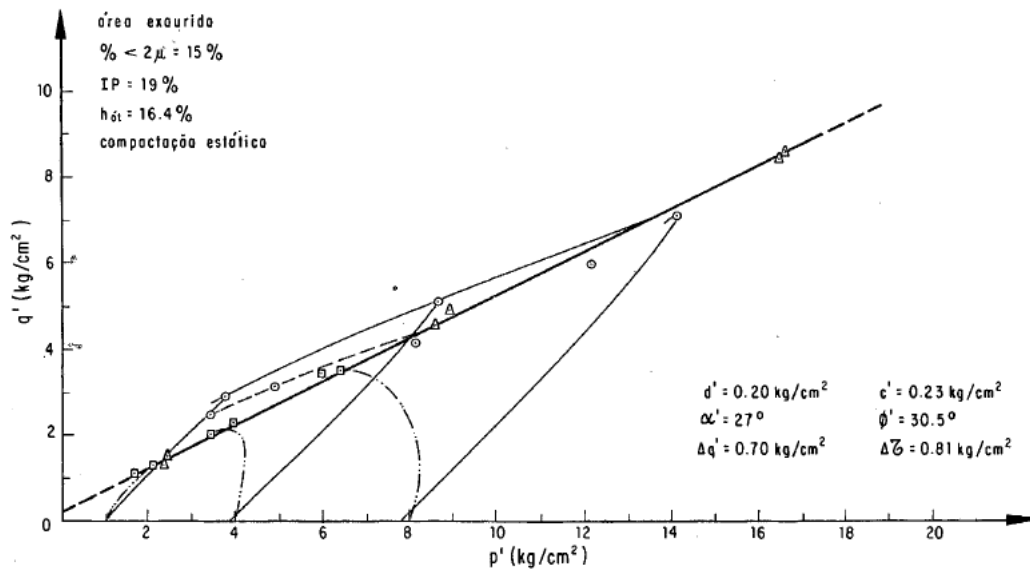


**Figura 113** – Envoltória modificada de resistência – Solo saprolítico de Gnaise – Chapéu D’uvas.



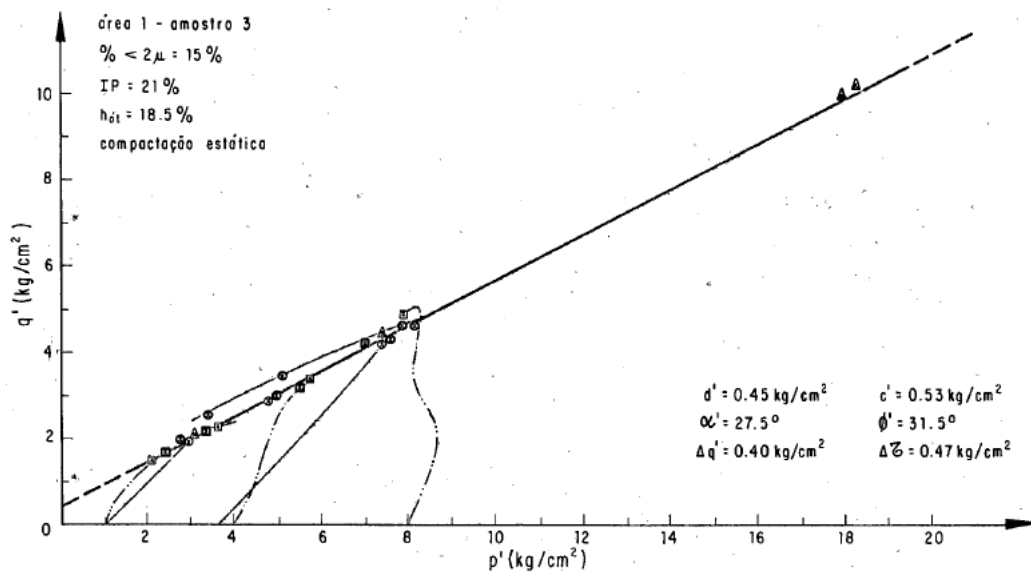
Fonte: Maiolino (1985).

**Figura 114** – Envoltória modificada de resistência – Solo saprolítico de Gnaise – Euclídes da Cunha.



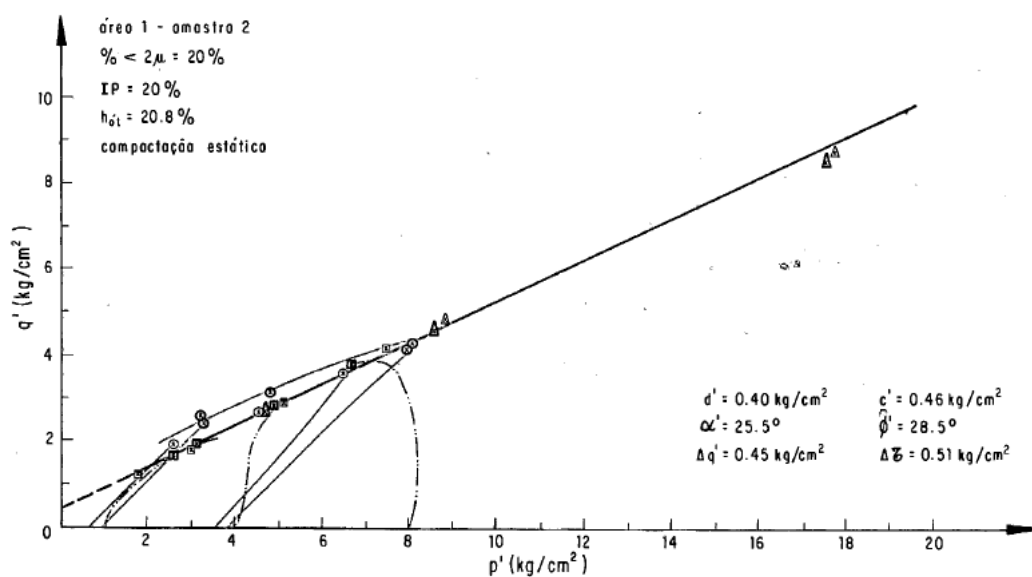
Fonte: Maiolino (1985).

**Figura 115** – Envoltória modificada de resistência – Solo saprolítico de Gnaise – Chapéu D'uvas.



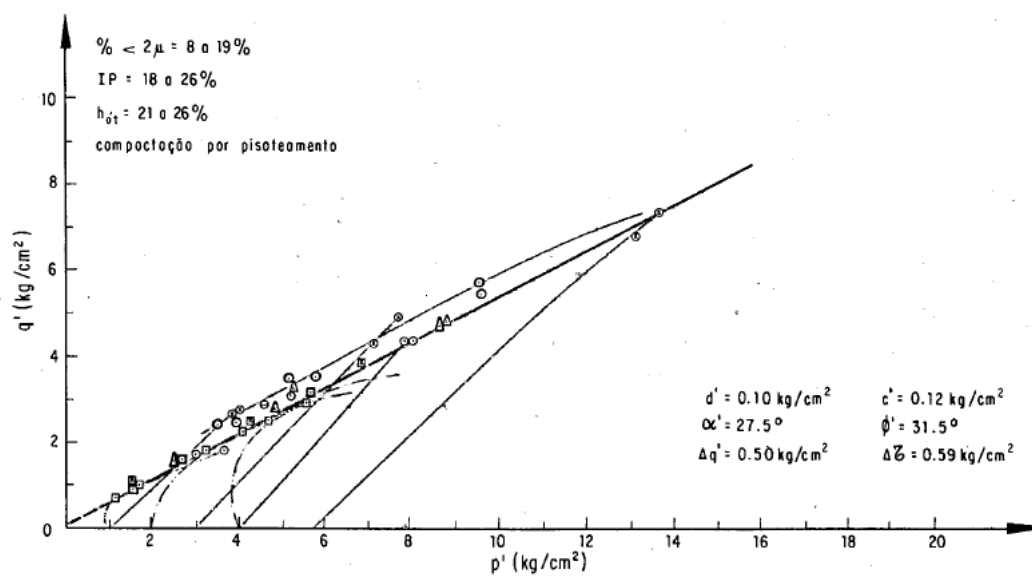
Fonte: Maiolino (1985).

**Figura 116** – Envoltória modificada de resistência – Solo saprolítico de Gnaise – Chapéu D'uvras.



Fonte: Maiolino (1985).

**Figura 117** – Envoltória modificada de resistência – Solo saprolítico de Filito – Manso.



Fonte: Maiolino (1985).

## APÊNDICE A – Profundidade de extração das amostras

Figura 118 – Perfil de sondagem do local de extração a Amostra 1 – Filito/ Metabásica.

SONDAGEM - AMOSTRA 1 COTA: 794,95

PROFUNDIDADE DAS CAMADAS AMOSTRAS	CLASSIFICAÇÃO GEOLOGICA	REVESTIMENTO DIAMETRO DO FURO NIVEL DA AGUA PERFIL GEOLÓGICO	DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	CONSISTENCIA COMPACIDADE	NUMEROS DE GOLPES
1	Sedim.		Argila arenosa (areia fina), pouco siltosa, com pedregulhos marron.	mto mole	2
1.15					$\frac{2}{18}$
1.52					$\frac{2}{34}$
2	Solo Residual		 	mole a médio	$\frac{6}{28}$
3					$\frac{5}{29}$
4			7		
5			$\frac{7}{28}$		
6			$\frac{1}{29}$		
6.50			13		
7			16		
8			18		
9			21		
10			19		
11			Argila arenosa (areia fina a média), pouco siltosa, com estrutura reliquiar preservada, marrom amarelada		
12			Argila areno-siltosa (areia fina a média), com estrutura reliquiar preservada, roxa clara		
13				médio a rijo	
13.95					
14					

PROF. FINAL 13,95 m

Fonte: Autora.

**Figura 119** – Perfil de sondagem do local de extração a Amostra 3 – Filito.

**SONDAGEM - AMOSTRA 3** COTA: 868,040

COTA E MÉTODO DE PERFURAÇÃO	PROFUNDIDADE DAS CAMADAS AMOSTRAS	CLASSIFICAÇÃO GEOLOGICA	REVESTIMENTO DIAMETRO DO FURO NIVEL DA ÁGUA PERFIL GEOLOGICO	DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	CONSISTENCIA COMPACTIDADE	NUMEROS DE GOLPES		
Trado Cavadeira	0,30	Sedim.		Argila silto-arenosa com raízes, marrom.	mto mole			
	1			Argila silto-arenosa com raízes, marrom.				
	1,52	Solo Residual		Argila silto-arenosa com raízes, marrom.	médio a rijo			
	2			Argila silto-arenosa com raízes, marrom.				
	3			Argila silto-arenosa com raízes, marrom.				
	4			Argila silto-arenosa com raízes, marrom.				
	5			Argila silto-arenosa com raízes, marrom.				
	6			Argila silto-arenosa com raízes, marrom.				
	6,50			Argila silto-arenosa com raízes, marrom.				
	7			Argila silto-arenosa com raízes, marrom.				
	8			Argila silto-arenosa com raízes, marrom.				
	9			Argila silto-arenosa com raízes, marrom.				
10	Circulação de Água		Argila silto-arenosa com raízes, marrom.	duro				
11			Argila silto-arenosa com raízes, marrom.					
12			Argila silto-arenosa com raízes, marrom.					
12,27				PROF. FINAL 12,27 m				

amarelo e marrom.

com cascalhos variados.

Siltite argilosa pouco arenosa, marrom e vermelho.

Siltite argilosa pouco arenosa, marrom e amarelo.

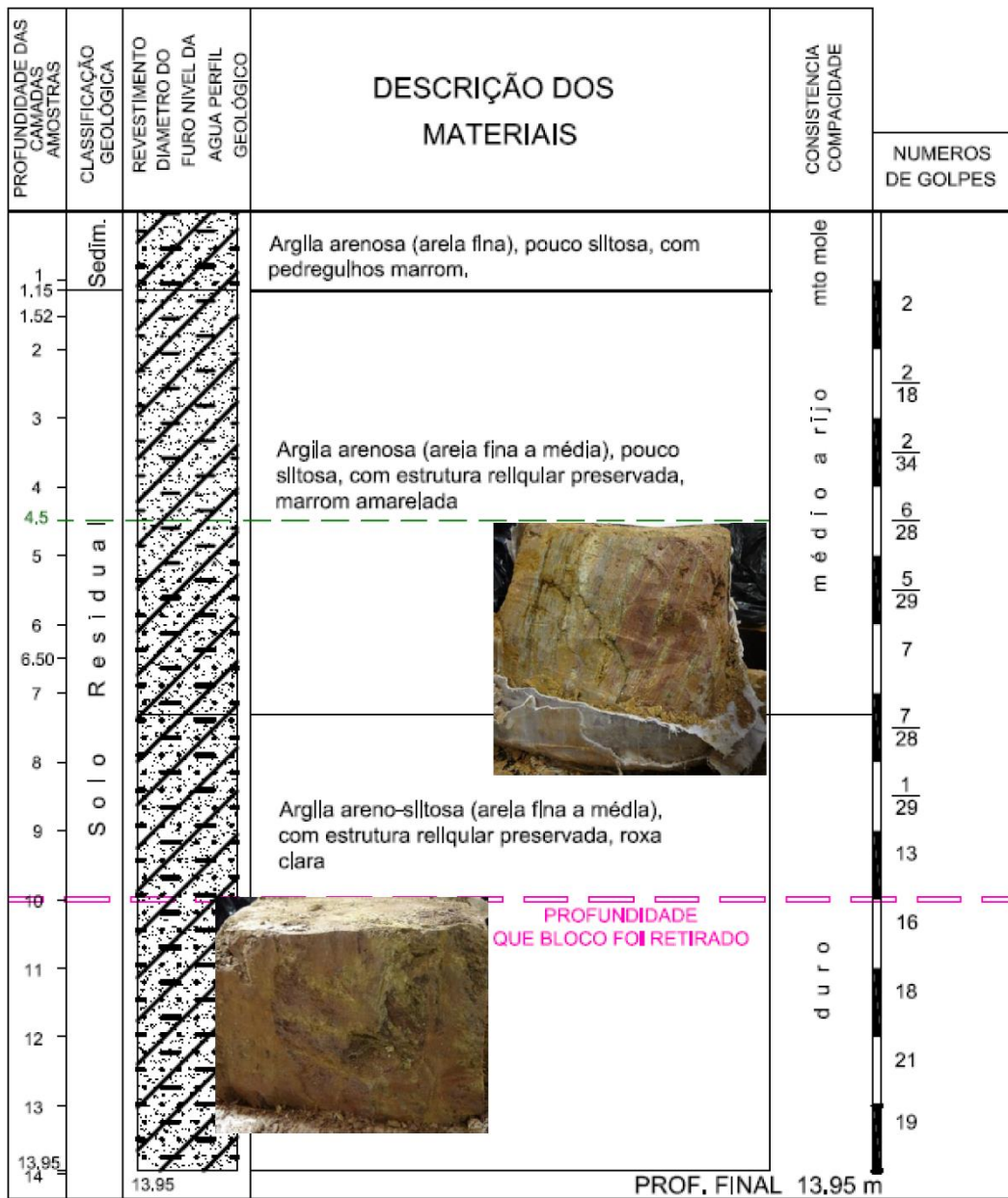
PROFUNDIDADE  
QUE BLOCO FOI RETIRADO

11,00

**Fonte:** Autora.

**Figura 120** – Perfil de sondagem do local de extração a Amostra 4 – Ultramilonito.

**SONDAGEM - AMOSTRA 4** COTA: 794,95



**Fonte:** Autora.

**Figura 121 – Perfil de sondagem do local de extração a Amostra 5 – Metabásica.**




**SONDAGEM - AMOSTRA 5** COTA: 803,32

PROFUNDIDADE DAS CAMADAS AMOSTRAS	CLASSIFICAÇÃO GEOLOGICA	REVESTIMENTO DIAMETRO DO FURO NIVEL DA AGUA PERFIL GEOLOGICO	DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	CONSISTENCIA COMPACIDADE	NUMEROS DE GOLFES
1	Sedim.		Silte argiloso, vermelho e cinza	mole a média	3/31
1,52			Silte argiloso (areia fina), vermelho		3/28
2			Silte arenoso (areia fina), com estrutura relíquar, parcialmente preservada, roxo acinzentado.		3/29
2,30	Solo Residual		<p>PROFUNDIDADE QUE BLOCO FOI RETIRADO</p>		4/31
3				4	
4				5	
5				6	
6				11	
6,10				10/31	
7				13	
8				9/31	
9				15	
10				14	
11					
12					
13					
14					
			PROF. FINAL 14,00m		

Fonte: Autora.

Figura 122 – Perfil de sondagem do local de extração a Amostra 6 – Ultramilonito.

## SONDAGEM - AMOSTRA 6 COTA: 794,95


PROFUNDIDADE DAS CAMADAS AMOSTRAS	CLASSIFICAÇÃO GEOLOGICA	REVESTIMENTO DIAMETRO DO FURO NIVEL DA AGUA PERFIL GEOLÓGICO	DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	CONSISTENCIA COMPACIDADE	NUMEROS DE GOLPES
1	Sed[m.]		Argila arenosa (areia fina), pouco siltosa, com pedregulhos marrom.	mto mole	2
1.15					$\frac{2}{18}$
1.52	Solo Residual		Argila arenosa (areia fina a média), pouco siltosa, com estrutura relictual preservada, marrom amarelada	médio a rijo	$\frac{2}{34}$
2					$\frac{6}{28}$
3					$\frac{5}{29}$
4					7
5					$\frac{7}{28}$
6.50					$\frac{1}{29}$
7					13
8	Solo		Argila areno-siltosa (areia fina a média), com estrutura reliquiar preservada, roxa clara	duro	16
9					18
10					21
11					19
12					
13					
13.95		13.95			
14					
PROF. FINAL 13.95 m					

Fonte: Autora.



**Figura 123 – Perfil de sondagem do local de extração a Amostra 7 – Granito pouco mineralizado.**

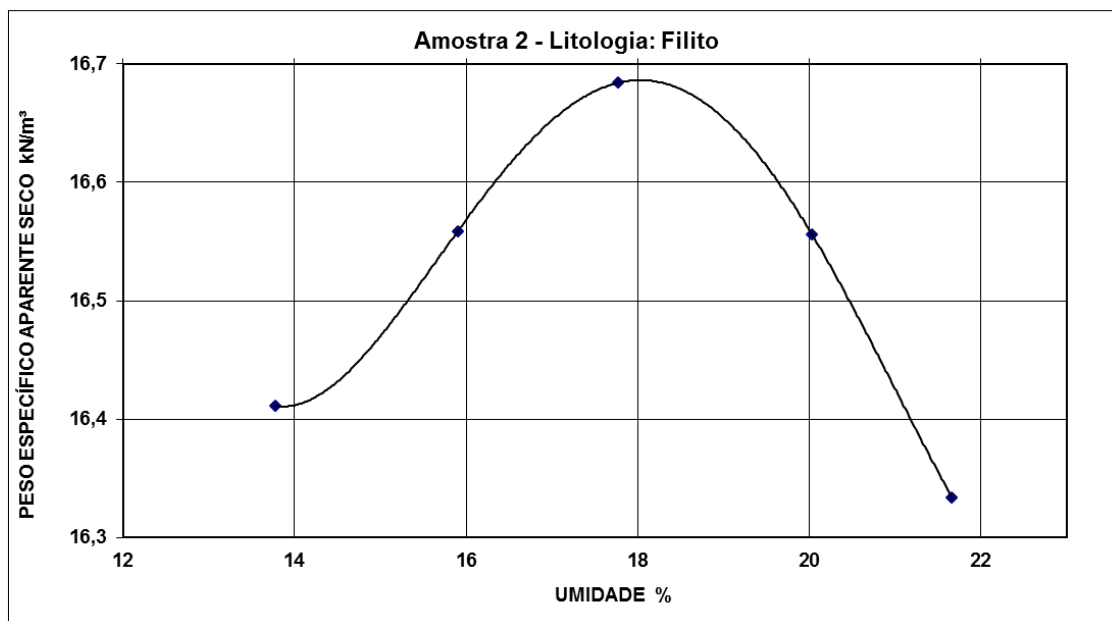
SONDAGEM AMOSTRA 7 COTA: 829.00

PROFUNDIDADE DAS CAMADAS AMOSTRAS	CLASSIFICAÇÃO GEOLÓGICA	REVESTIMENTO DIAMETRO DO FURO NÍVEL DA ÁGUA PERFIL GEOLÓGICO	DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	CONSISTÊNCIA COMPACTIDADE	NÚMEROS DE GOLPES		
					1	2	3
0.20	AT.		Aterro de argila silto-arenosa com raízes, marrom e cinza.				
1			Silte argiloso pouco arenoso com mica, vermelho.	mole	$\frac{1}{15}$	$\frac{2}{15}$	$\frac{2}{15}$
2							
2.50				médio	$\frac{2}{15}$	$\frac{2}{15}$	$\frac{2}{15}$
3			Silte argiloso pouco arenoso com caulim e mica, marrom e vermelho.		$\frac{1}{15}$	$\frac{2}{15}$	$\frac{3}{15}$
4							
4.54			 <p>PROFUNDIDADE QUE BLOCO FOI RETIRADO</p>	mole a médio	$\frac{2}{15}$	$\frac{3}{15}$	$\frac{4}{15}$
5							
6				médio a rijo	$\frac{2}{15}$	$\frac{3}{15}$	$\frac{5}{15}$
7					$\frac{3}{15}$	$\frac{4}{15}$	$\frac{5}{15}$
8			Silte argiloso arenoso com caulim e mica, marrom e cinza.		$\frac{3}{15}$	$\frac{5}{15}$	$\frac{6}{15}$
8.60					$\frac{4}{15}$	$\frac{5}{15}$	$\frac{7}{15}$
9			Silte arenoso argiloso com fragmentos de rocha, caulim e mica, cinza.	med. compacto a compacto	$\frac{5}{15}$	$\frac{6}{15}$	$\frac{8}{15}$
10					$\frac{7}{15}$	$\frac{10}{15}$	$\frac{15}{15}$
10.80							
11					$\frac{3}{15}$	$\frac{4}{15}$	$\frac{5}{15}$
12					$\frac{3}{15}$	$\frac{4}{15}$	$\frac{6}{15}$
12.00							
13				médio a rijo	$\frac{4}{15}$	$\frac{5}{15}$	$\frac{7}{15}$
14			Silte argiloso pouco arenoso com caulim e mica, variegado.		$\frac{5}{15}$	$\frac{6}{15}$	$\frac{8}{15}$
15					$\frac{5}{15}$	$\frac{7}{15}$	$\frac{8}{15}$
16					$\frac{5}{15}$	$\frac{7}{15}$	$\frac{8}{15}$
16.67					$\frac{6}{15}$	$\frac{7}{15}$	$\frac{9}{15}$
17					$\frac{7}{15}$	$\frac{8}{15}$	$\frac{11}{15}$
18					$\frac{7}{15}$	$\frac{10}{15}$	$\frac{12}{15}$
19			Silte arenoso argiloso com fragmentos de rocha, caulim e mica, cinza e amarelo.	compacto a muito compacto	$\frac{8}{15}$	$\frac{9}{15}$	$\frac{13}{15}$
20					$\frac{9}{15}$	$\frac{11}{15}$	$\frac{14}{15}$
21					$\frac{8}{15}$	$\frac{14}{15}$	$\frac{18}{15}$
22					$\frac{30}{8}$	—	—
22.43			IMPENETRÁVEL À FERRAMENTA DE PERCUSSÃO PROF. FINAL: 22.43m				

Fonte: Autora.

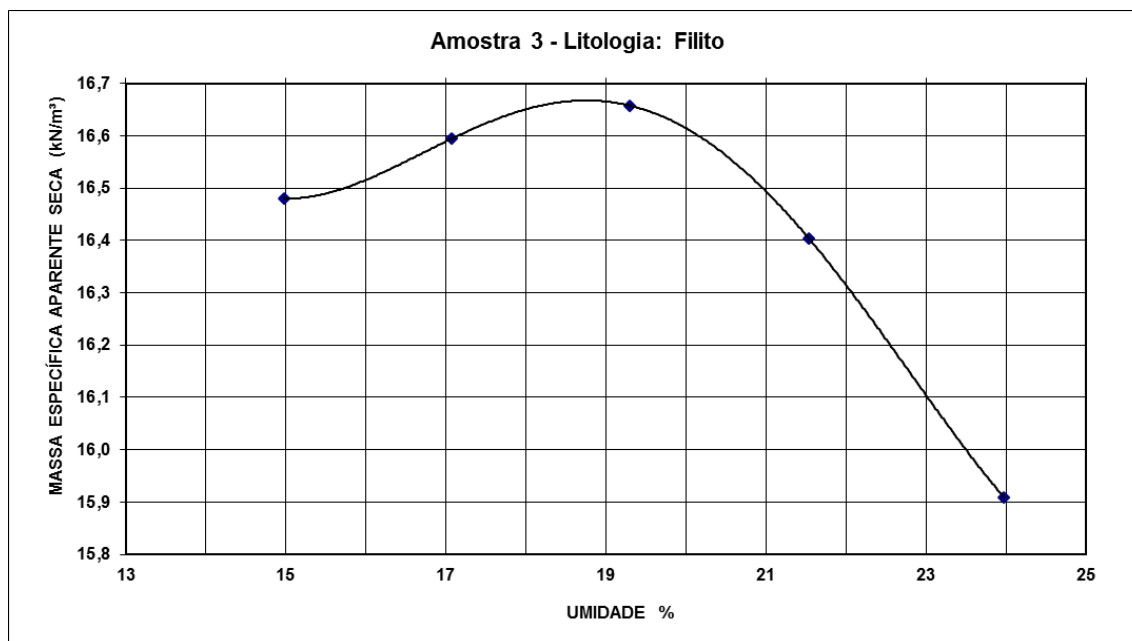
## APÊNDICE B – Ensaio de compactação

Figura 124 – Ensaio de compactação – Amostra 2 - Litologia: Filito.



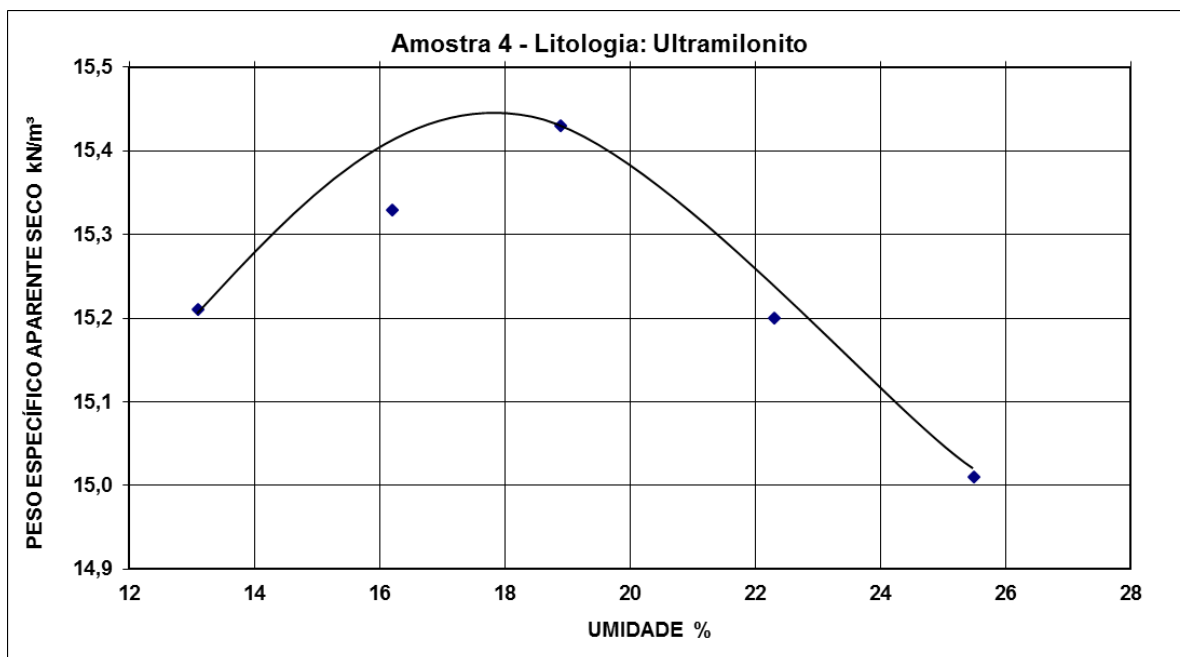
Fonte: Autora.

Figura 125 – Ensaio de compactação – Amostra 3 - Litologia: Filito.



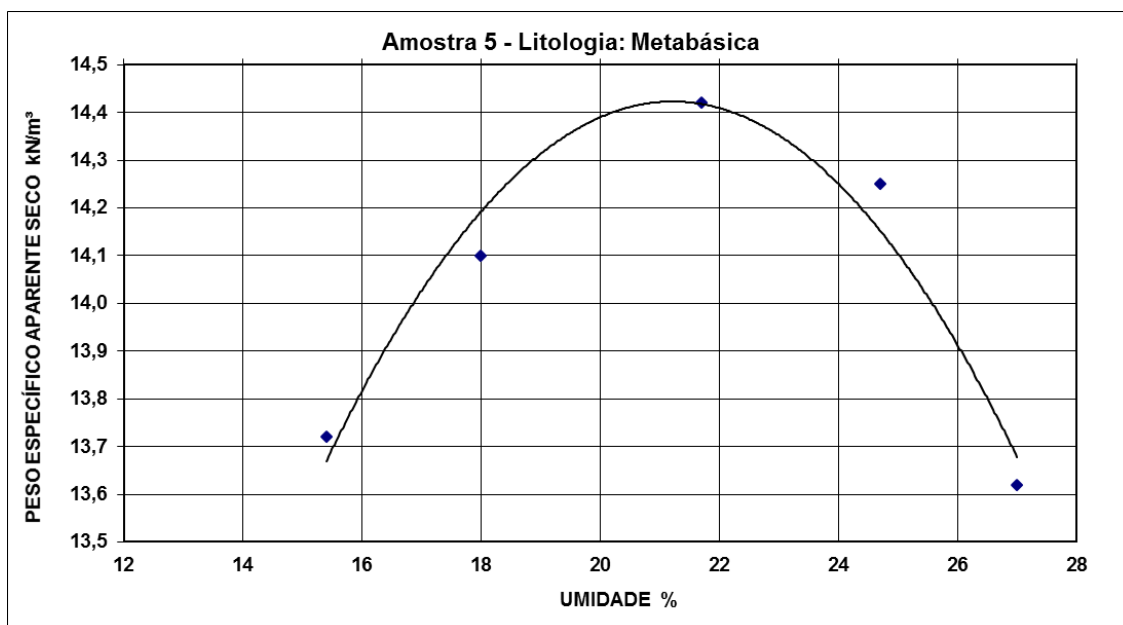
Fonte: Autora.

**Figura 126 – Ensaio de compactação – Amostra 4 - Litologia: Ultramilonito.**



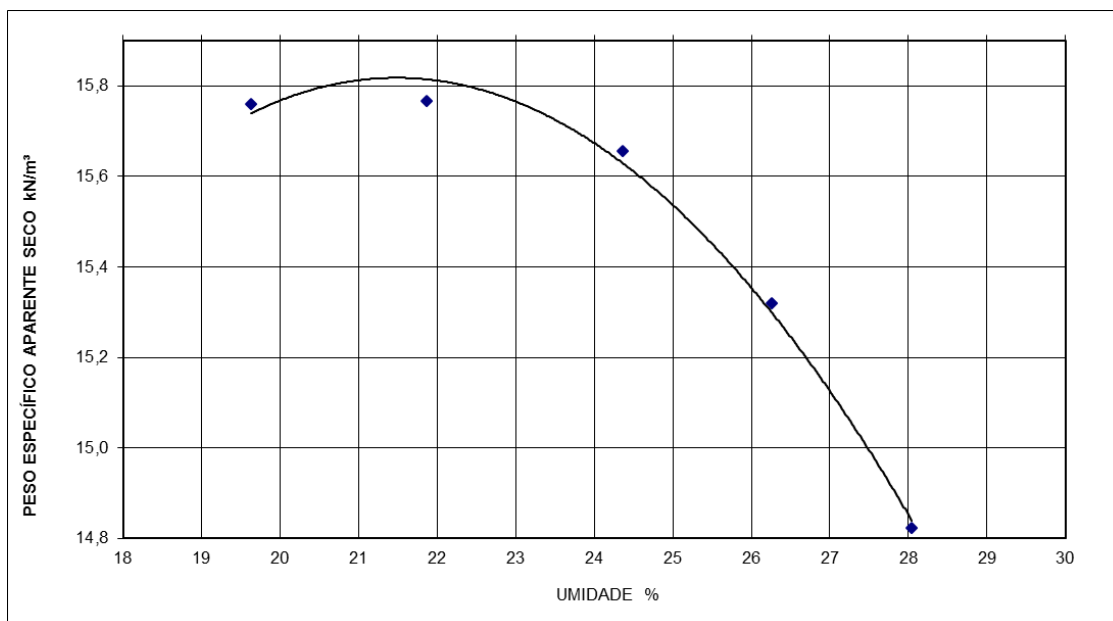
Fonte: Autora.

**Figura 127 – Ensaio de compactação – Amostra 5 - Litologia: Metabásica.**



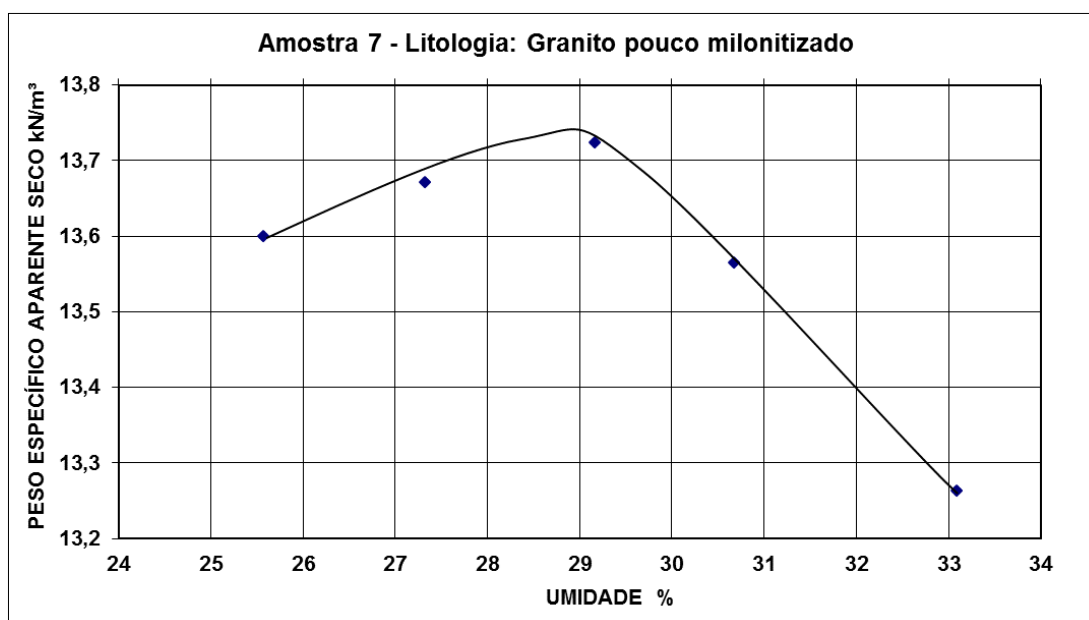
Fonte: Autora.

**Figura 128** – Ensaio de compactação – Amostra 6 - Litologia: Ultramilonito.



**Fonte:** Autora.

**Figura 129** – Ensaio de compactação – Amostra 7 - Litologia: Granito pouco milonitizado.



**Fonte:** Autora.

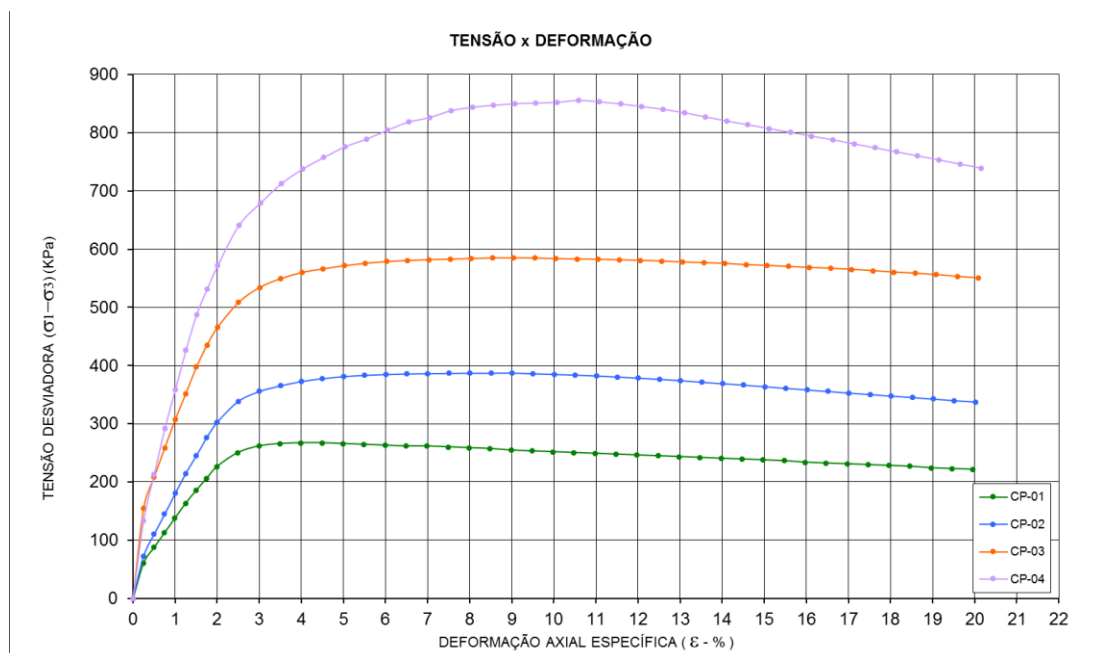
## APÊNDICE C – ENSAIOS TRIAXIAIS UU NÃO SATURADO

Tabela 28 - Amostra 1 – Filito/Metabásica - h<sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	16,18	16,29	16,93	16,31
Grau de saturação (%)	61	61	63	61
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	15,64	15,62	15,52	15,61
Índice de Vazios	0,71	0,71	0,72	0,71
$\Delta h$ (%)	-0,2	-0,1	0,5	-0,1
GC (%)	95,3%	95,1%	94,5%	95,1%

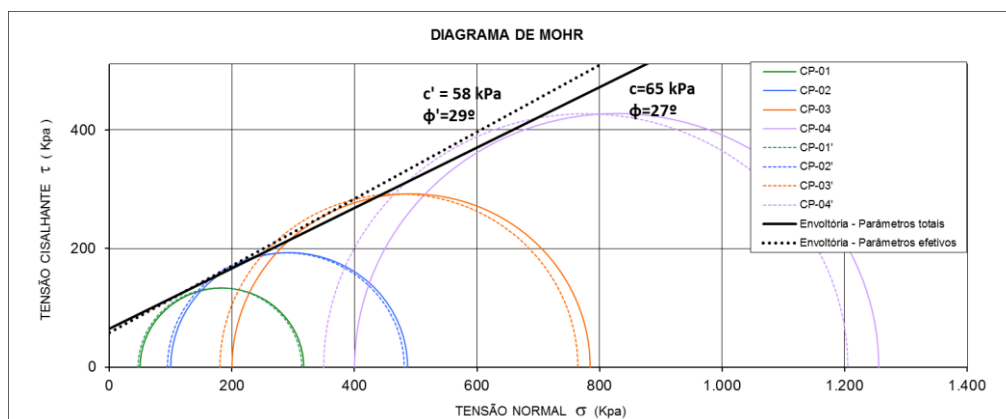
Fonte: Autora.

Figura 130 – Amostra 1 – Filito/Metabásica - h<sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.



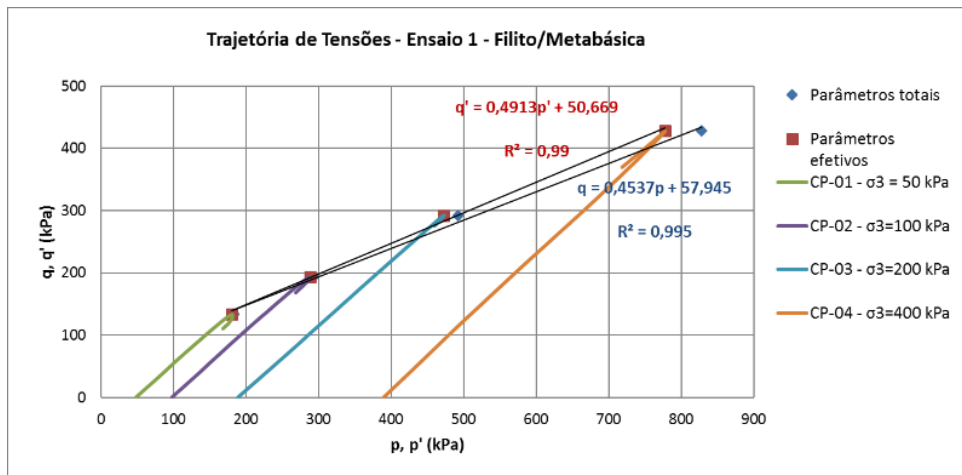
Fonte: Autora.

Figura 131 – Amostra 1 - Filito/Metabásica - h<sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.



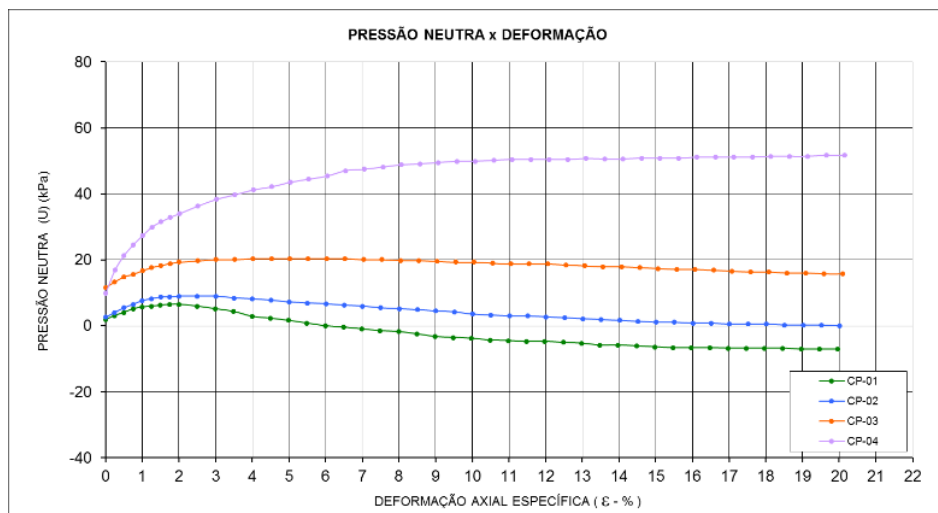
Fonte: Autora.

**Figura 132 – Amostra 1 - Filito/Metabásica - hótima – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Figura 133 – Amostra 1 - Filito/Metabásica - hótima – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Tabela 29 – Amostra 1 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  – Ensaio UU não saturado.**

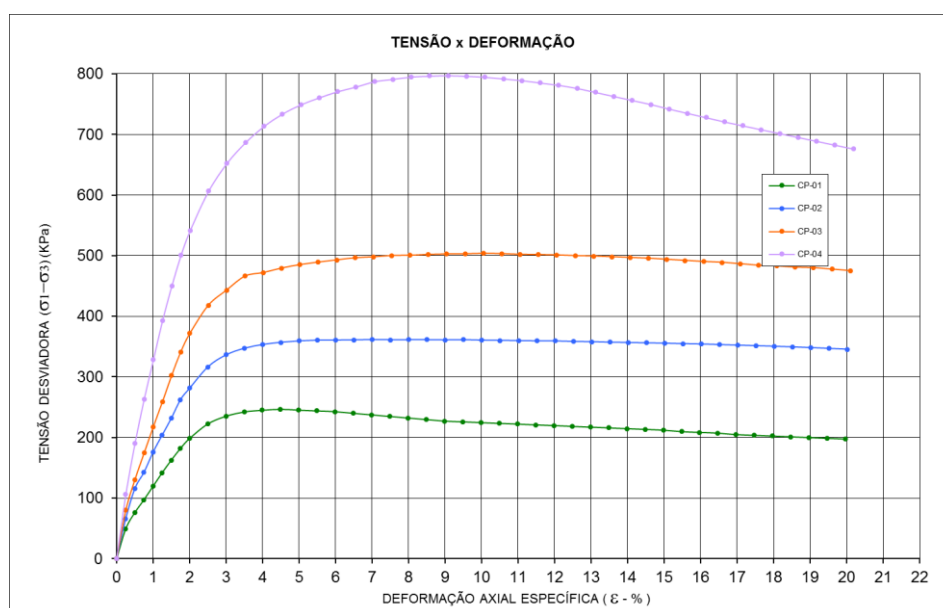
Amostra 1 - Litologia: Filito/Metabásica - hótima				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	267,14	133,57	1,00	13.357
100	386,64	193,32	1,10	17.575
200	584,66	292,33	1,10	26.575
400	855,66	427,83	1,30	32.910

Fonte: Autora.

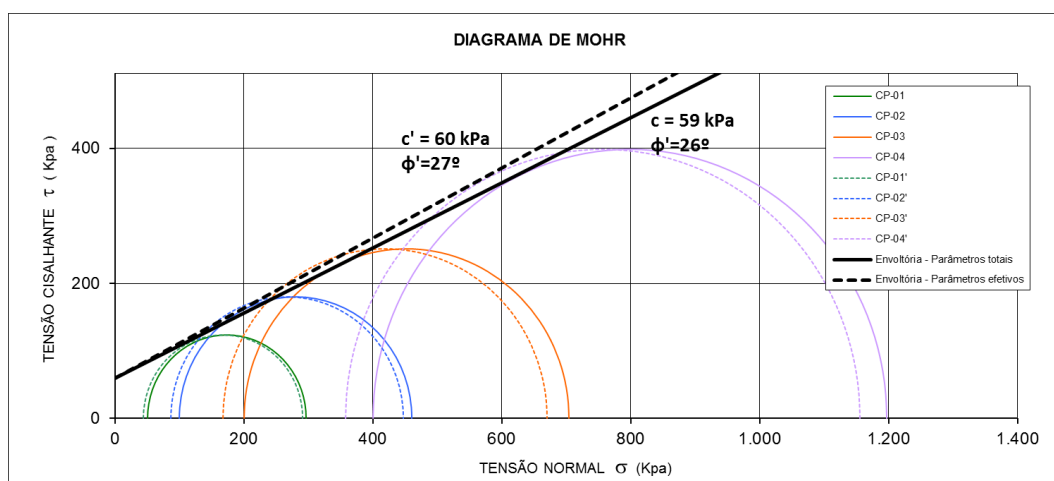
**Tabela 30** - Amostra 1 – Filito/Metabásica -  $h_{ótima}+2\%$  – Ensaio UU não saturado.

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	18,31	18,35	18,31	18,32
Grau de saturação (%)	63	63	63	63
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	15,61	15,61	15,62	15,61
Índice de Vazios	0,83	0,83	0,82	0,83
$\Delta h$ (%)	1,9	1,9	1,9	1,9
GC (%)	95,0%	95,1%	95,1%	95,1%

Fonte: Autora.

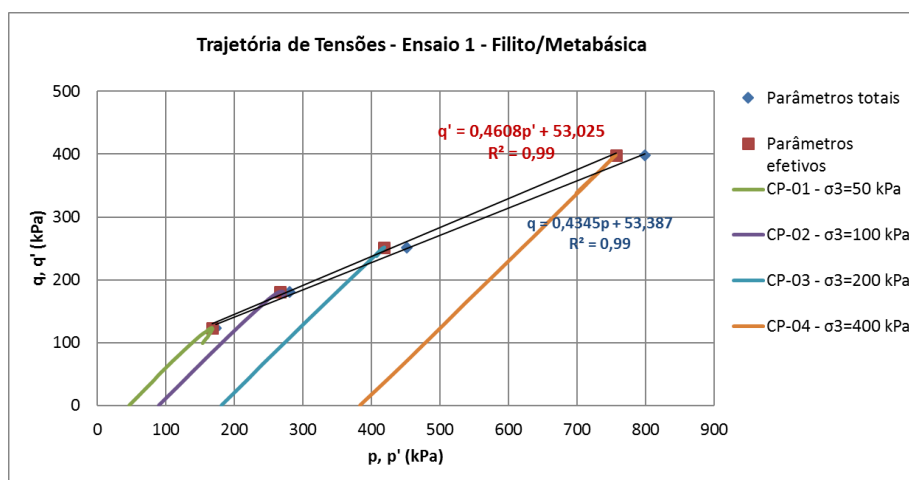
**Figura 134** – Amostra 1 – Filito/Metabásica -  $h_{ótima}+2\%$  – Ensaio UU não saturado.

Fonte: Autora.

**Figura 135** – Amostra 1 - Filito/Metabásica -  $h_{ótima}+2\%$  – Ensaio UU não saturado.

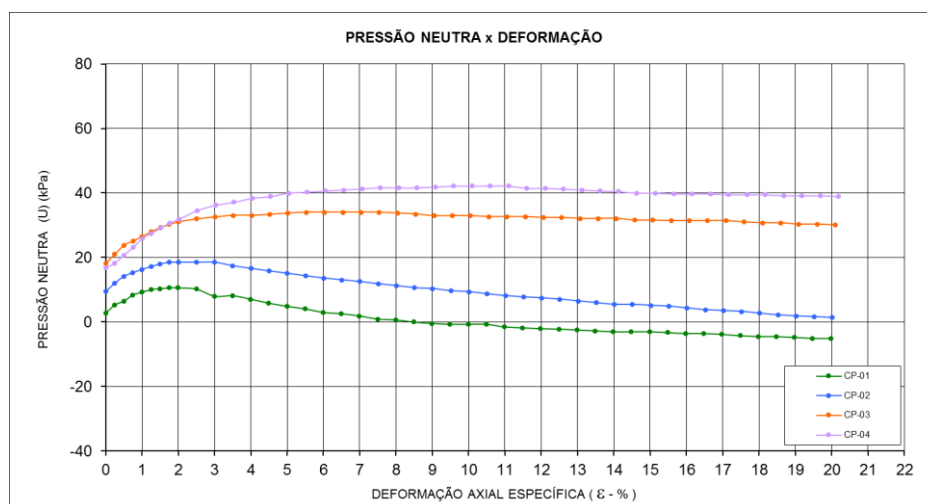
Fonte: Autora.

**Figura 136** – Amostra 1 - Filito/Metabásica -  $h_{ótima}+2\%$  – Ensaio UU não saturado.



Fonte: Autora.

**Figura 137** – Amostra 1 - Filito/Metabásica -  $h_{ótima}+2\%$  – Ensaio UU não saturado.



Fonte: Autora.

**Tabela 31** – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  - Ensaio UU não saturado.

Amostra 1 - Litologia: Filito/Metabásica - $h_{ótima}+2\%$				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	246,55	123,27	1,00	12.327
100	360,58	180,29	1,00	18.029
200	503,55	251,77	1,25	20.142
400	797,10	398,55	1,25	31.884

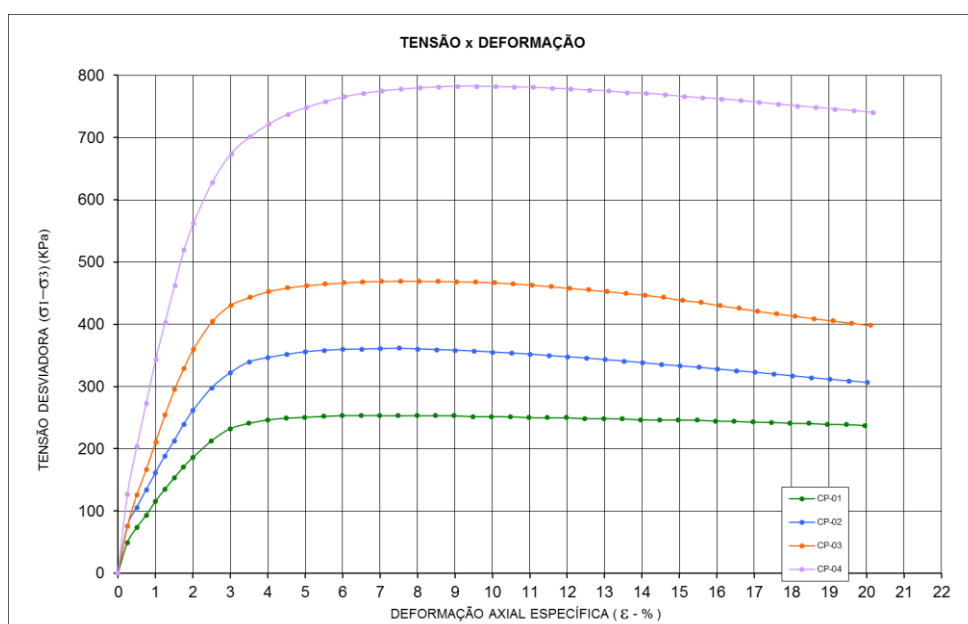
Fonte: Autora.



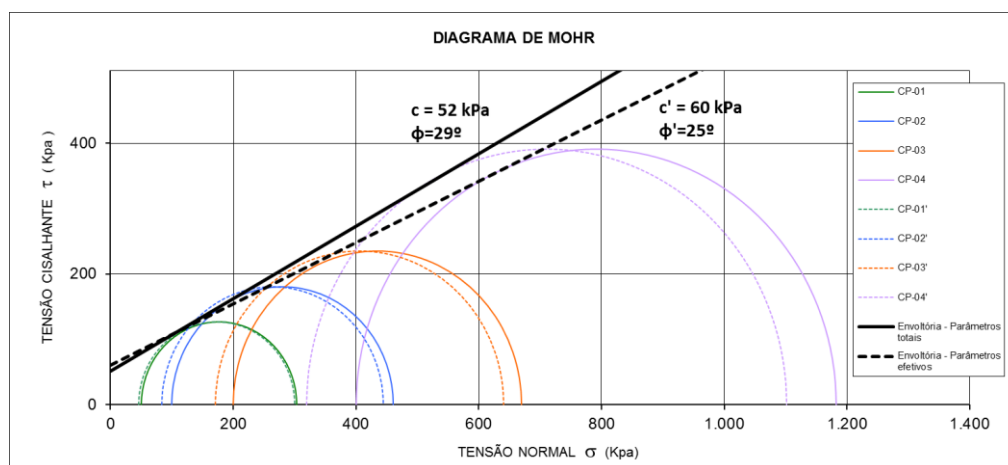
**Tabela 32 - Amostra 1 – Filito/Metabásica -  $h_{ótima}+4\%$  – Ensaio UU não saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	20,31	20,38	20,36	20,33
Grau de saturação (%)	70	70	70	70
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	15,61	15,60	15,60	15,60
Índice de Vazios	0,83	0,83	0,83	0,82
$\Delta h$ (%)	3,9	4,0	3,9	3,9
GC (%)	95,0%	95,0%	95,0%	95,0%

Fonte: Autora.

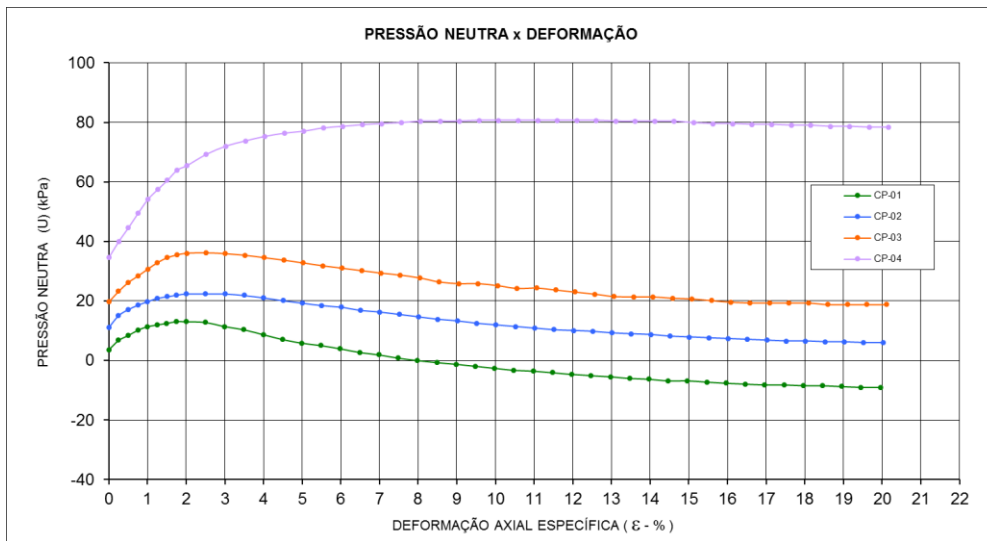
**Figura 138 – Amostra 1 – Filito/Metabásica -  $h_{ótima}+4\%$  – Ensaio UU não saturado.**

Fonte: Autora.

**Figura 139 – Amostra 1 - Filito/Metabásica -  $h_{ótima}+4\%$  – Ensaio UU não saturado.**

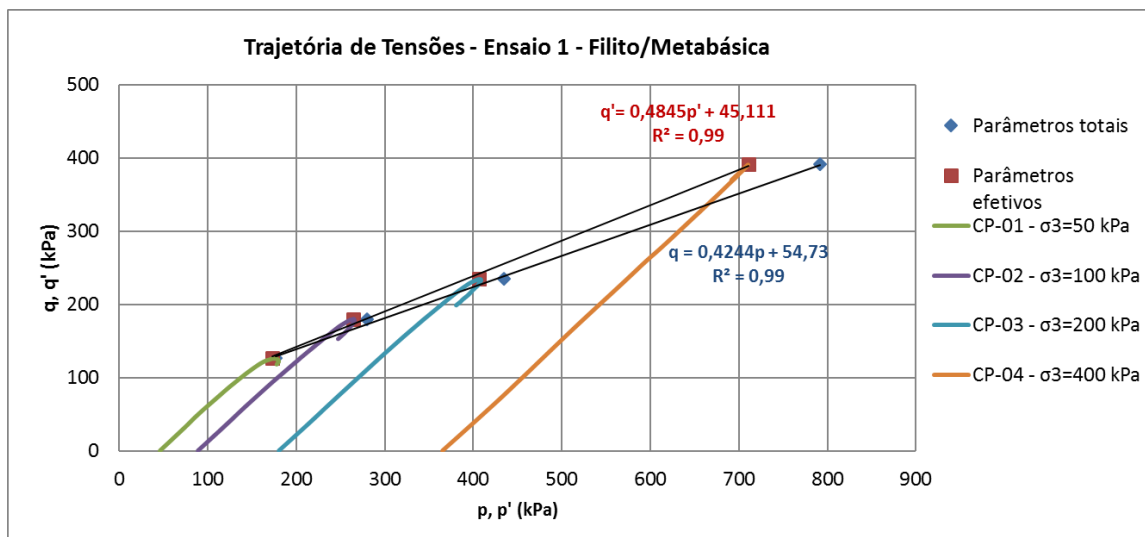
Fonte: Autora.

**Figura 140** – Amostra 1 - Filito/Metabásica - hótima+4% – Ensaio UU não saturado.



Fonte: Autora.

**Figura 141** – Amostra 1 - Filito/Metabásica - hótima+4% – Ensaio UU não saturado.



Fonte: Autora.

**Tabela 33** – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  - – Ensaio UU não saturado.

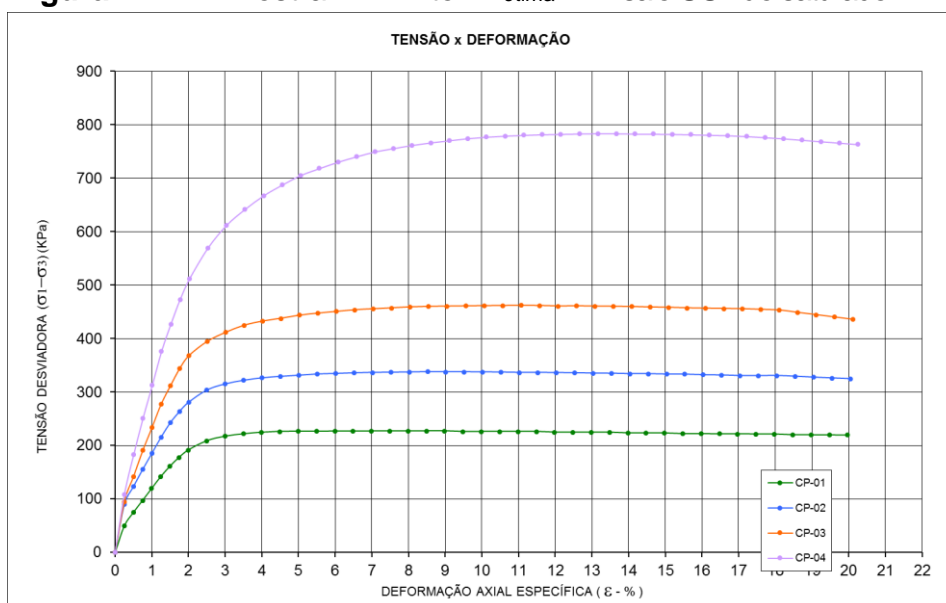
Amostra 1 - Litologia: Filito/Metabásica - hótima+4%				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2^*(\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	253,62	126,81	1,15	11.027
100	360,70	180,35	1,10	16.395
200	469,58	234,79	1,00	23.479
400	782,50	391,25	1,10	35.568

Fonte: Autora.

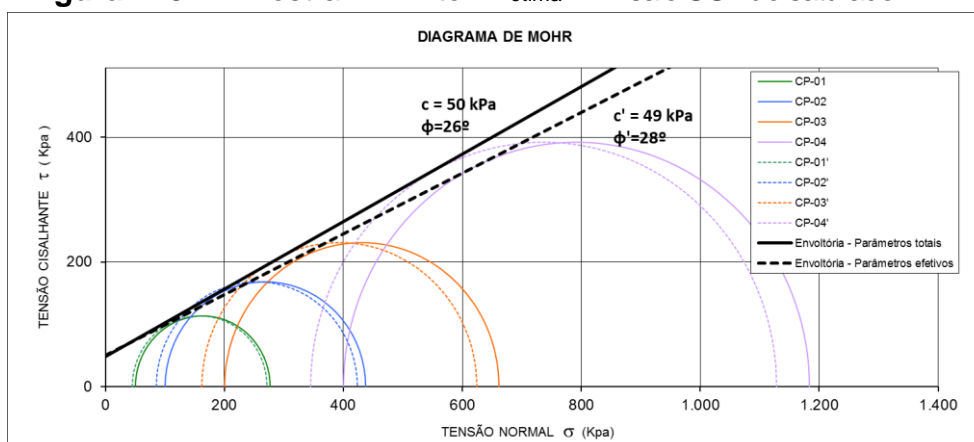
**Tabela 34 - Amostra 2 – Filito - hótima - Ensaio UU não saturado**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	17,92	17,97	17,85	17,97
Grau de saturação (%)	66	66	65	66
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	15,869	15,859	15,873	15,859
Índice de Vazios	0,77	0,77	0,77	0,77
$\Delta h$ (%)	-0,18	-0,13	-0,25	-0,13
GC	95,1%	95,1%	95,2%	95,1%

Fonte: Autora.

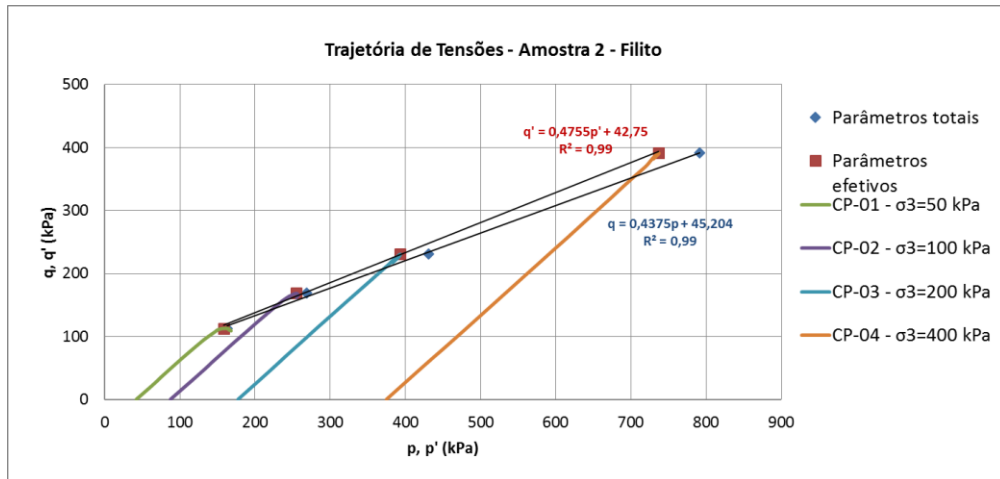
**Figura 142 – Amostra 2 – Filito - hótima – Ensaio UU não saturado**

Fonte: Autora.

**Figura 143 – Amostra 2 - Filito - hótima – Ensaio UU não saturado.**

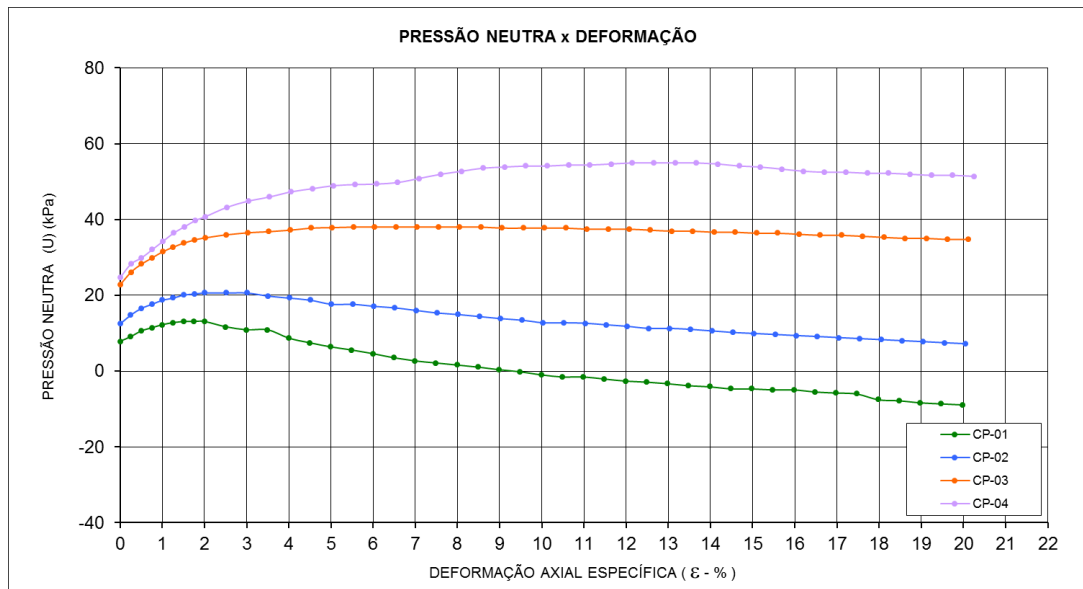
Fonte: Autora.

**Figura 144 – Amostra 2 - Filito - hótima – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Figura 145 – Amostra 2 - Filito - hótima – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Tabela 35 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  – Ensaio UU não saturado**

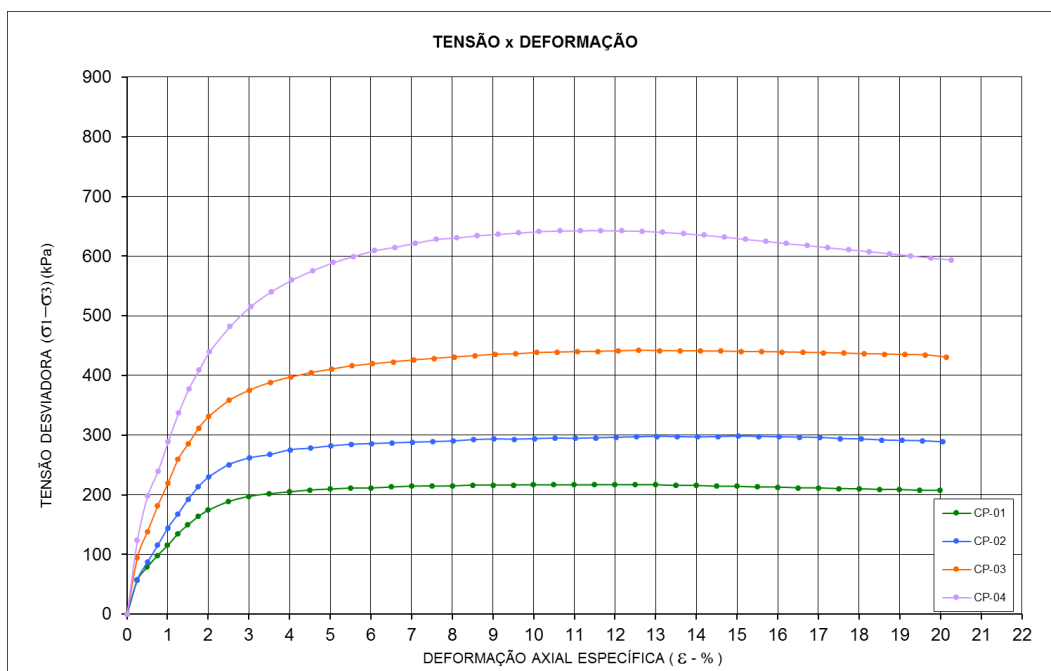
Amostra 2 - Litologia: Filito - hótima				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	226,52	113,26	0,95	11.922
100	337,59	168,80	0,90	18.755
200	461,78	230,89	1,00	23.089
400	783,61	391,81	1,40	27.986

Fonte: Autora.

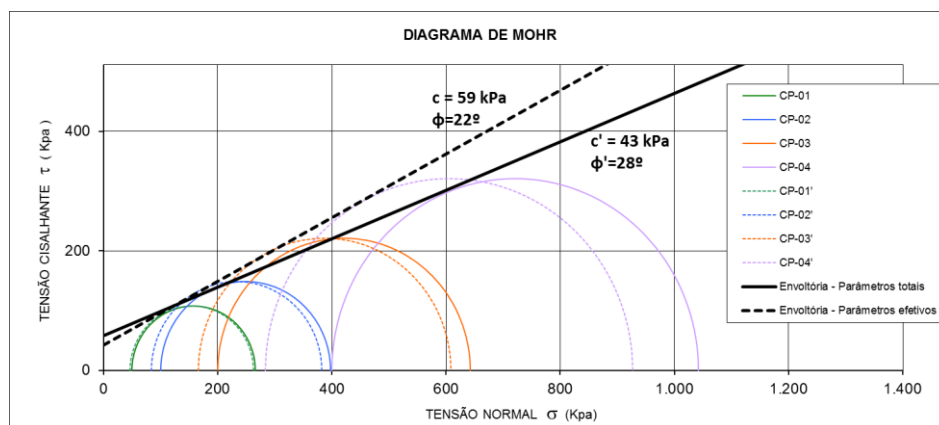
**Tabela 36 - Amostra 2 – Filito - h<sub>ótima</sub> +2% – Ensaio UU não saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	20,10	20,13	20,00	20,18
Grau de saturação (%)	73	73	73	74
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	15,85	15,84	15,87	15,84
Índice de Vazios	0,77	0,77	0,77	0,77
$\Delta h$ (%)	2,00	2,03	1,90	2,08
GC	95,0%	95,0%	95,1%	95,0%

Fonte: Autora.

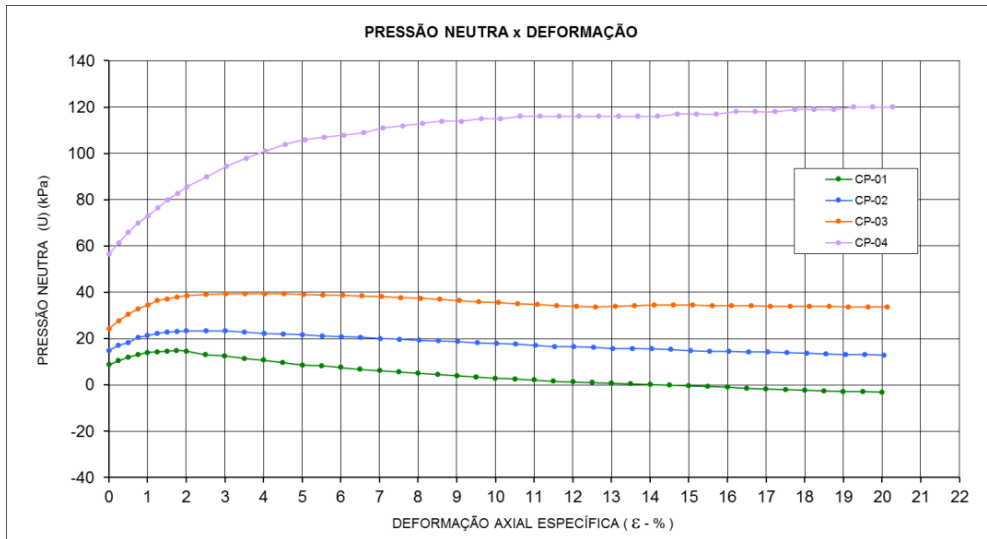
**Figura 146 – Amostra 2 – Filito - h<sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado.**

Fonte: Autora.

**Figura 147 – Amostra 2 - Filito - h<sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado.**

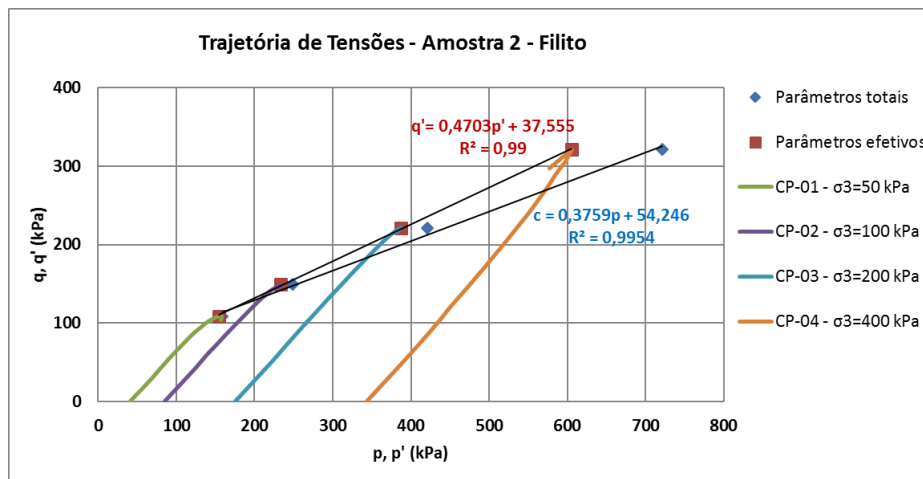
Fonte: Autora.

**Figura 148 – Amostra 2 - Filito - hótima + 2% – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Figura 149 – Amostra 2 - Filito - hótima + 2% – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Tabela 37 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante E<sub>50</sub> – Ensaio UU não saturado.**

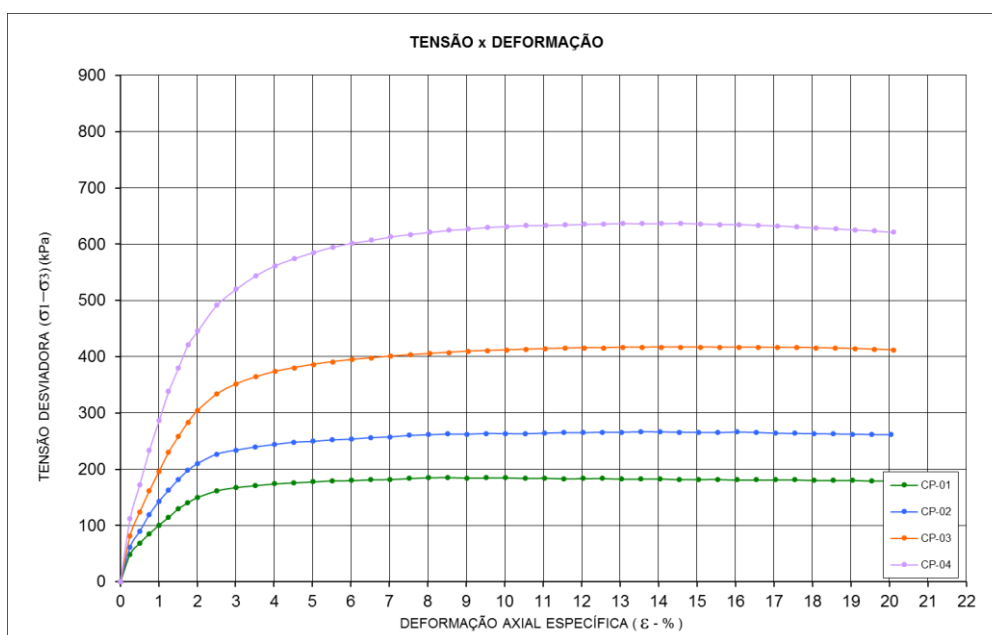
Amostra 2 - Litologia: Filito - hótima+2%				
σ <sub>3</sub> (kPa)	σ <sub>1</sub> -σ <sub>3</sub> (kPa)	1/2*(σ <sub>1</sub> -σ <sub>3</sub> )(kPa)	ε (%)	E <sub>50</sub> (kPa)
50	216,52	108,26	0,80	13.532
100	297,91	148,95	1,00	14.895
200	442,10	221,05	1,00	22.105
400	642,43	321,21	1,20	26.768

Fonte: Autora

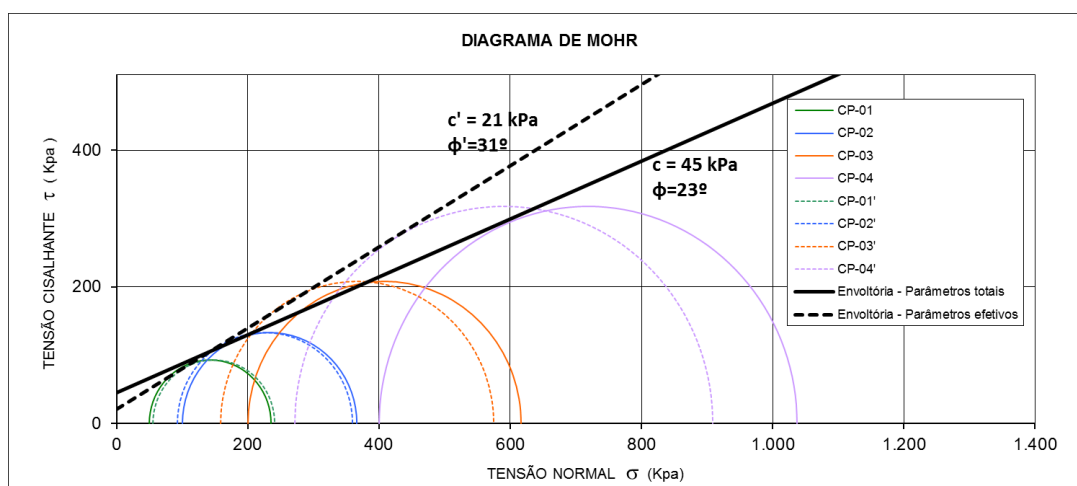
**Tabela 38 - Amostra 2 – Filito - hótima + 4% – Ensaio UU não saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	21,95	22,08	21,93	21,99
Grau de saturação (%)	80	81	80	80
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	15,87	15,86	15,88	15,87
Índice de Vazios	0,77	0,77	0,76	0,77
$\Delta h$ (%)	3,85	3,98	3,83	3,89
GC	95,1%	95,1%	95,2%	95,1%

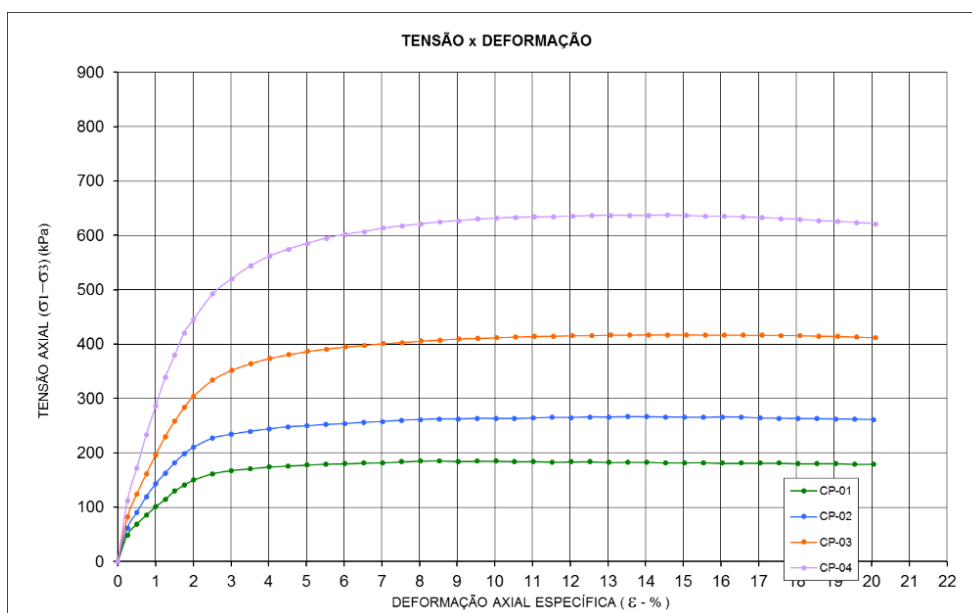
Fonte: Autora.

**Figura 150 – Amostra 2 – Filito - hótima + 4% – Ensaio UU não saturado.**

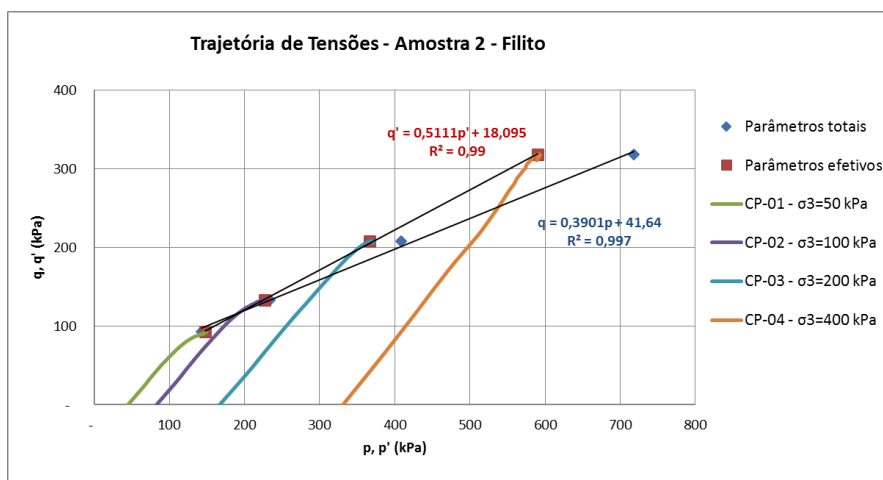
Fonte: Autora.

**Figura 151 – Amostra 2 - Filito - hótima + 4% – Ensaio UU não saturado.**

Fonte: Autora.

**Figura 152** – Amostra 2 - Filito - hótima + 4% – Ensaio UU não saturado.

Fonte: Autora.

**Figura 153** – Amostra 2 - Filito - hótima + 4% – Ensaio UU não saturado.

Fonte: Autora.

**Tabela 39** – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  – Ensaio UU não saturado.

Amostra 2 - Litologia: Filito - hótima+4%				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	185,71	92,85	0,95	9.774
100	266,69	133,35	0,95	14.036
200	416,53	208,27	1,05	19.835
400	636,89	318,45	1,10	28.950

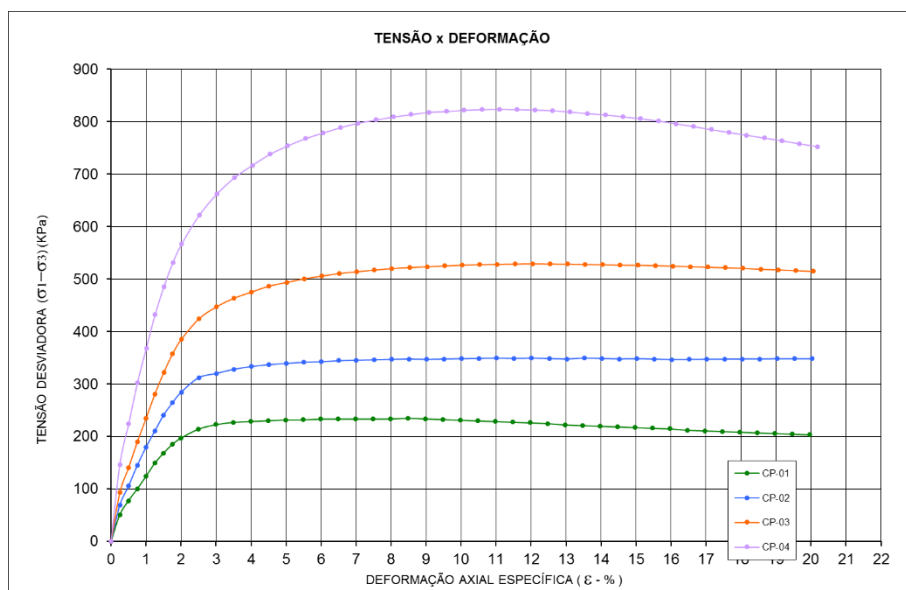
Fonte: Autora



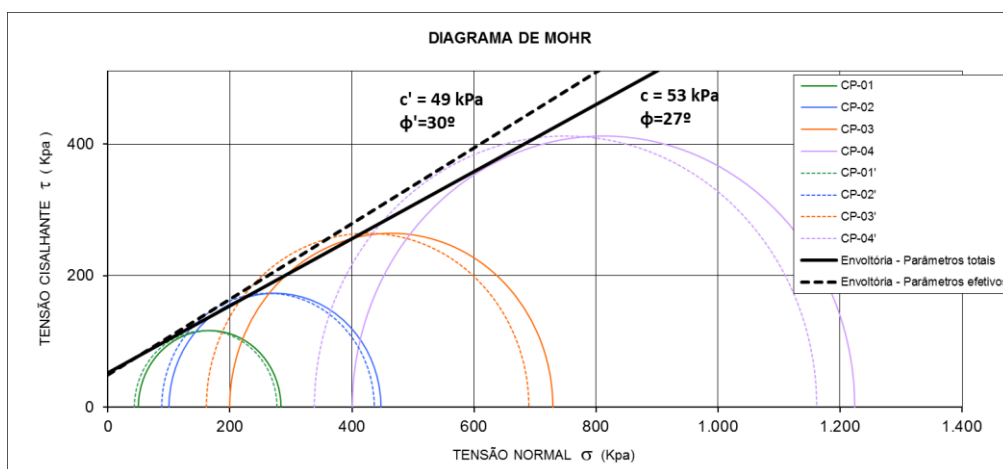
**Tabela 40 - Amostra 3 – Filito - hótima – Ensaio UU não saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	18,47	18,56	18,56	18,60
Grau de saturação (%)	68	69	69	69
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	15,89	15,89	15,89	15,88
Índice de Vazios	0,75	0,75	1,59	0,75
$\Delta h$ (%)	-0,33	-0,24	-0,24	-0,20
GC	95,3%	95,3%	95,3%	95,3%

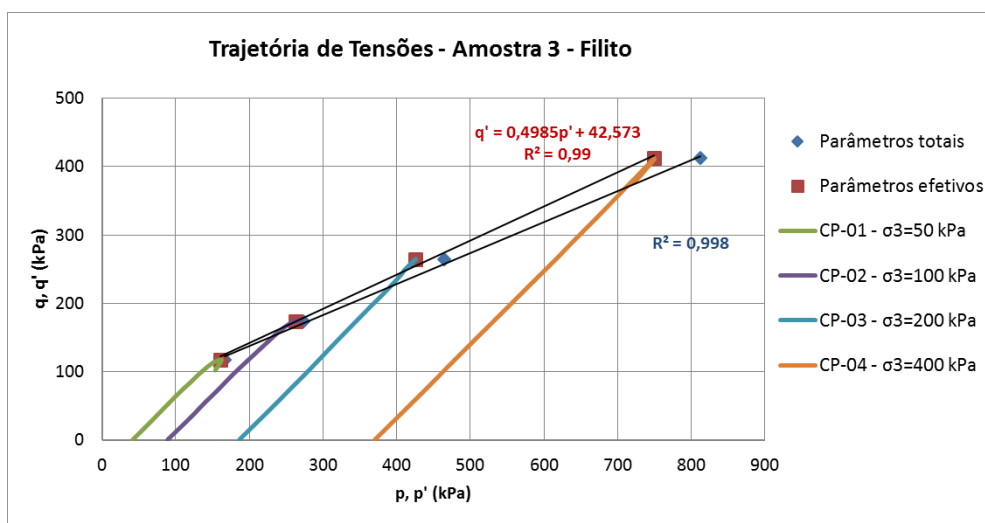
Fonte: Autora.

**Figura 154 – Amostra 3 – Filito - hótima – Ensaio UU não saturado.**

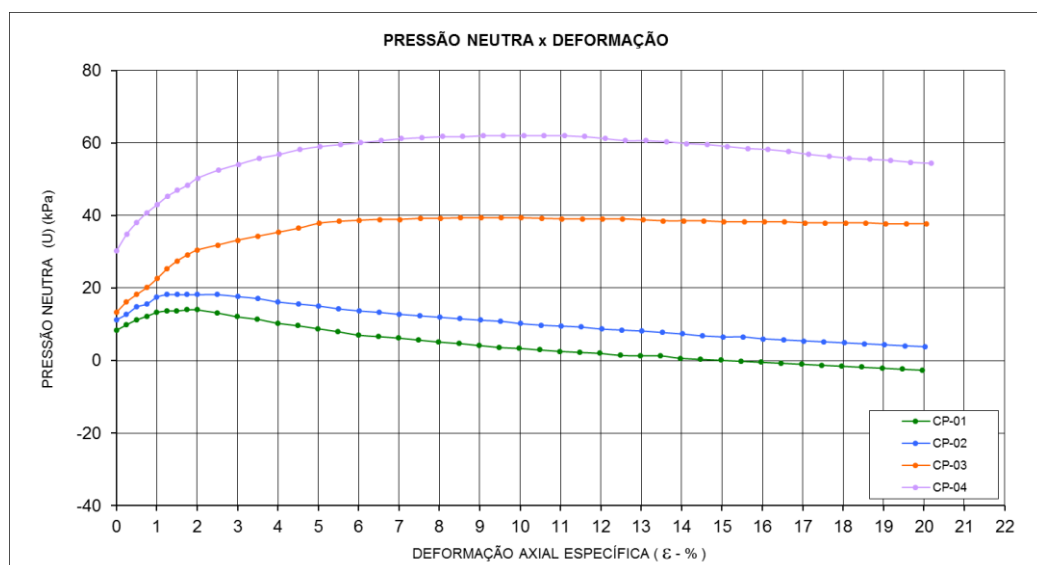
Fonte: Autora.

**Figura 155 – Amostra 3 - Filito - hótima – Ensaio UU não saturado.**

Fonte: Autora.

**Figura 156 – Amostra 3 - Filito - hótima – Ensaio UU não saturado.**

Fonte: Autora.

**Figura 157 – Amostra 3 - Filito - hótima – Ensaio UU não saturado.**

Fonte: Autora.

**Tabela 41 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  – Ensaio UU não saturado.**

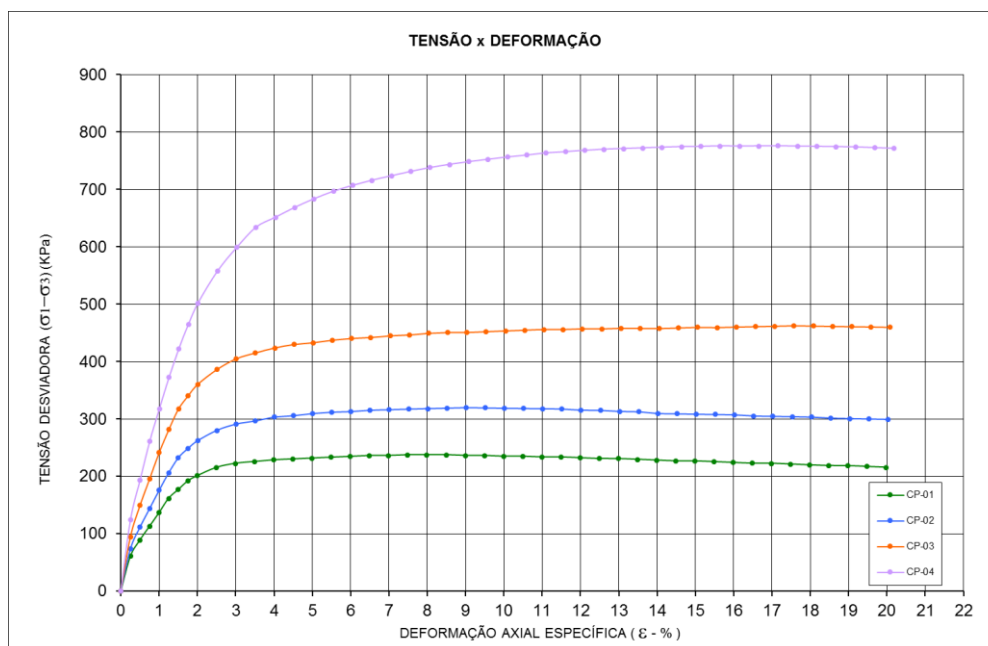
Amostra 3 - Litologia: Filito - hótima				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	233,55	116,78	1,00	11.678
100	347,62	173,81	1,00	17.381
200	528,83	264,42	1,15	22.993
400	823,75	411,88	1,26	32.689

Fonte: Autora

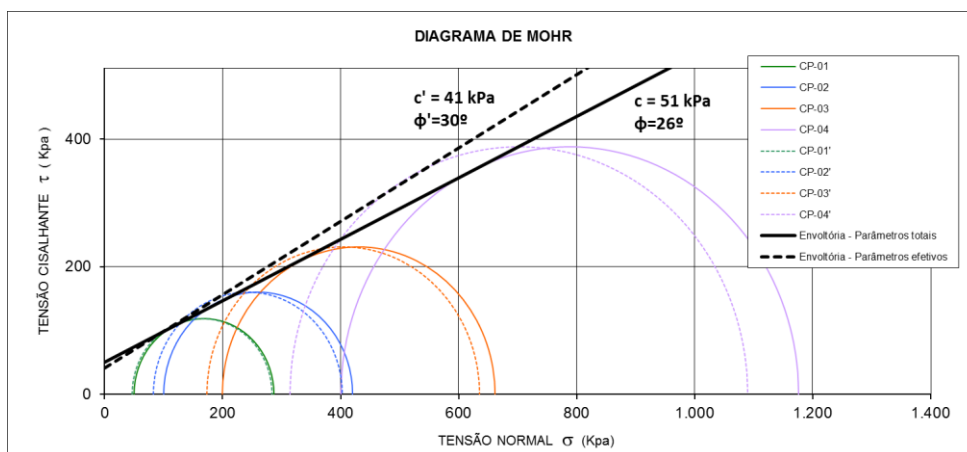
**Tabela 42 - Amostra 3 – Filito -  $h_{ótima} + 2\%$  – Ensaio UU não saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	20,64	20,52	20,53	20,66
Grau de saturação (%)	76	76	76	76
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	15,87	15,88	15,88	15,88
Índice de Vazios	0,75	0,75	0,75	0,75
$\Delta h$ (%)	1,84	1,72	1,73	1,86
GC	95,2%	95,2%	95,3%	95,3%

Fonte: Autora.

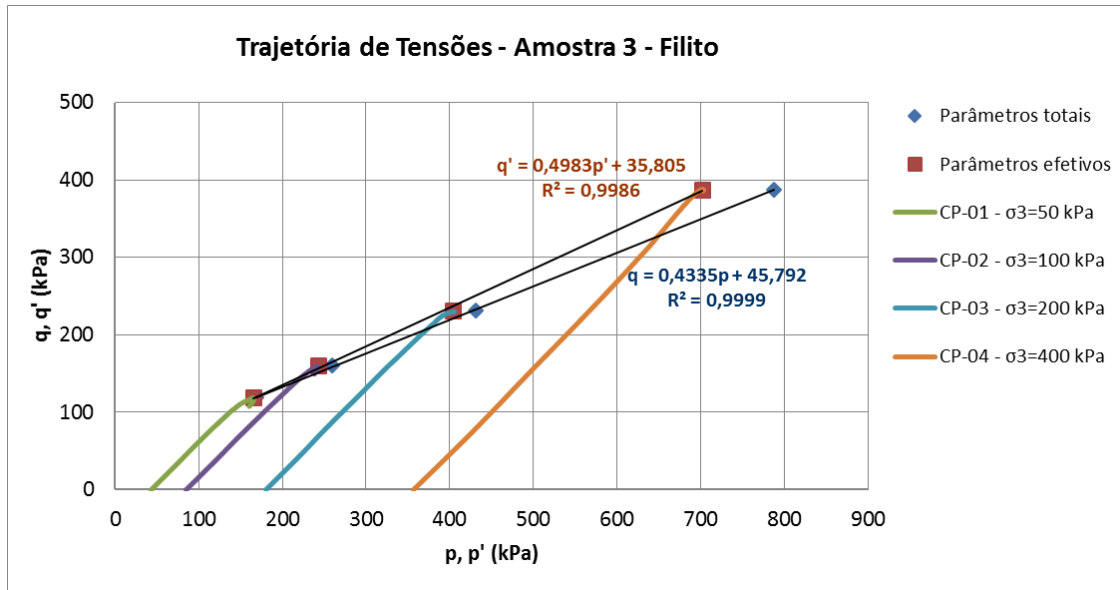
**Figura 158 – Amostra 3 – Filito -  $h_{ótima} + 2\%$  – Ensaio UU não saturado.**

Fonte: Autora.

**Figura 159 – Amostra 3 - Filito -  $h_{ótima} + 2\%$  – Ensaio UU não saturado.**

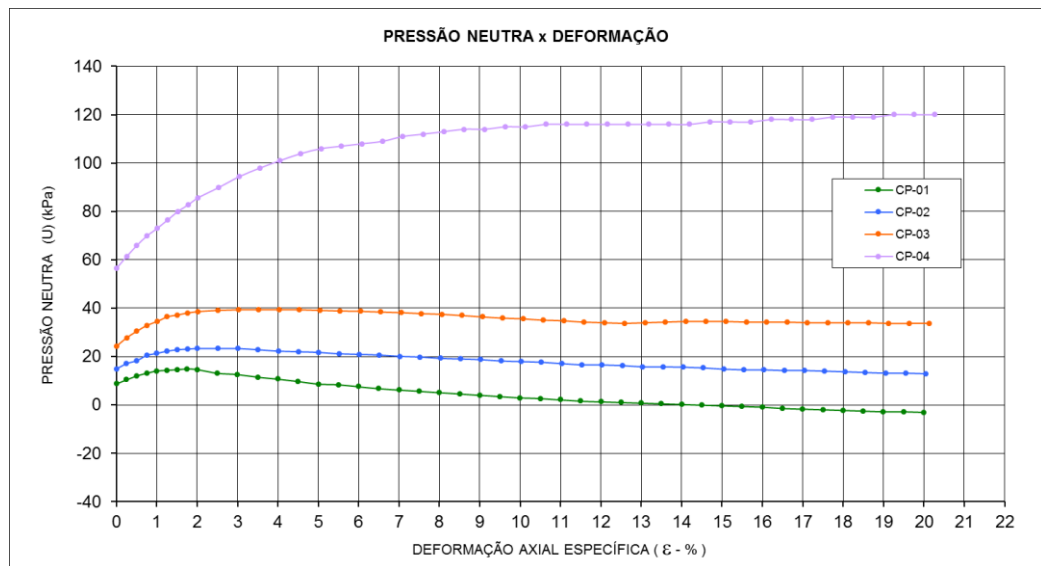
Fonte: Autora.

**Figura 160** – Amostra 3 - Filito - hótima + 2% – Ensaio UU não saturado.



Fonte: Autora.

**Figura 161** – Amostra 3 - Filito - hótima + 2% – Ensaio UU não saturado.



Fonte: Autora.

**Tabela 43** – Cálculo do módulo de deformabilidade secante E<sub>50</sub> – Ensaio UU não saturado.

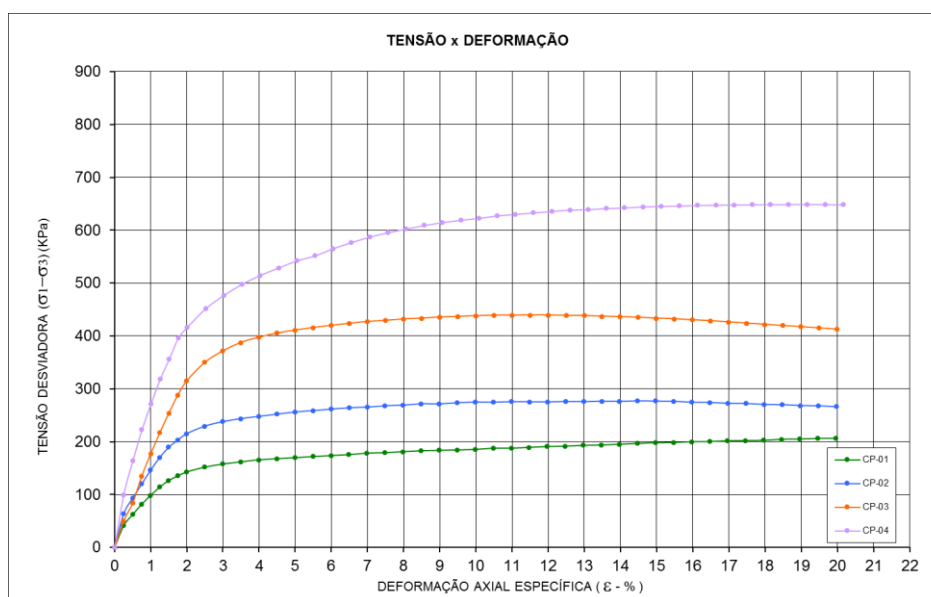
Amostra 3 - Litologia: Filito - hótima+2%				
σ <sub>3</sub> (kPa)	σ <sub>1</sub> -σ <sub>3</sub> (kPa)	1/2*(σ <sub>1</sub> -σ <sub>3</sub> )(kPa)	ε (%)	E <sub>50</sub> (kPa)
50	237,36	118,68	0,80	14.835
100	319,77	159,88	0,90	17.765
200	461,64	230,82	1,00	23.082
400	775,62	387,81	1,30	29.832

Fonte: Autora

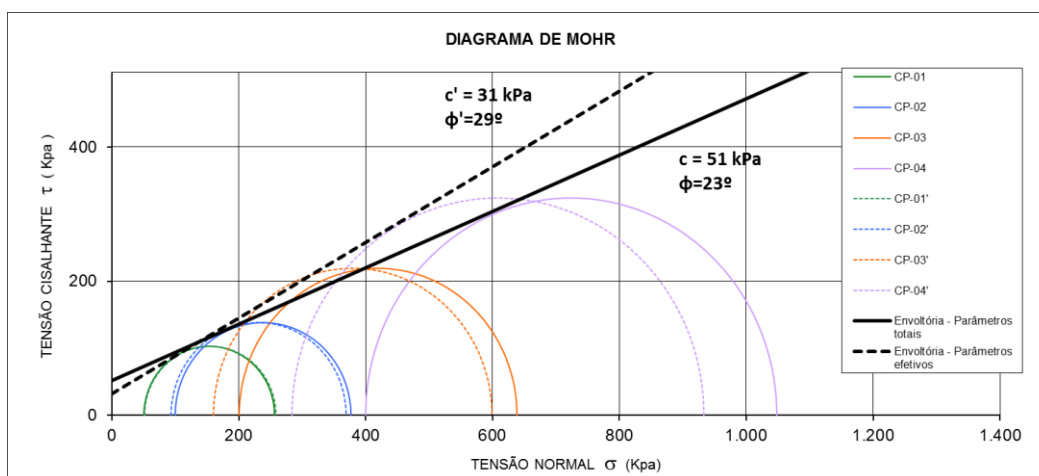
**Tabela 44 - Amostra 3 – Filito - hótima + 4% – Ensaio UU não saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	22,66	22,61	22,70	22,70
Grau de saturação (%)	84	84	83	84
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	15,86	15,88	15,87	15,87
Índice de Vazios	0,75	0,75	0,75	0,75
$\Delta h$ (%)	3,86	3,81	3,90	3,90
GC	95,2%	95,2%	95,2%	95,2%

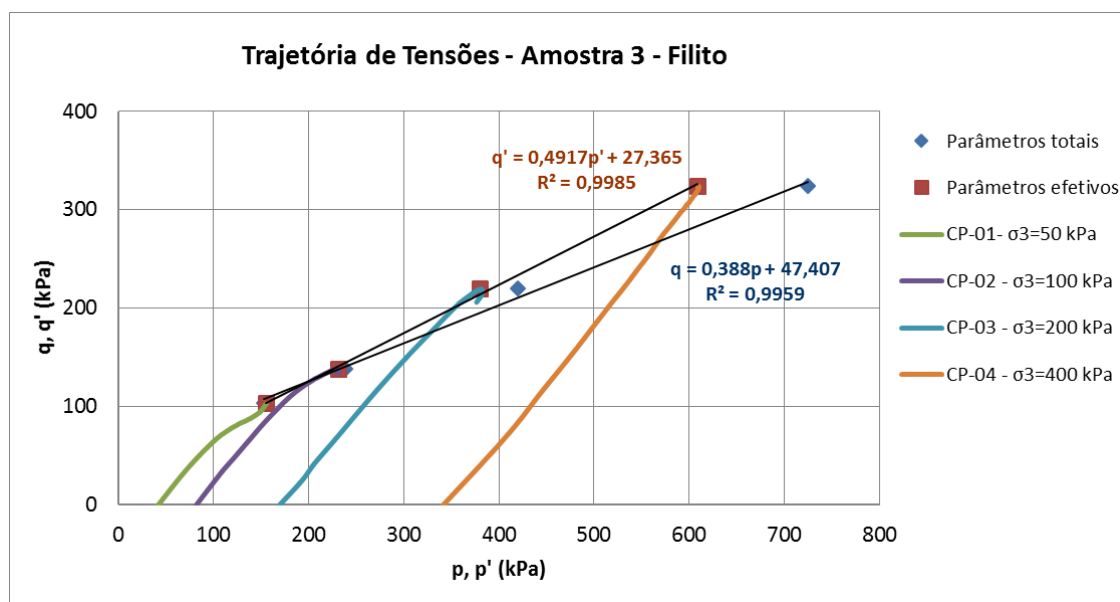
Fonte: Autora.

**Figura 162 – Amostra 3 – Filito - hótima + 4% – Ensaio UU não saturado.**

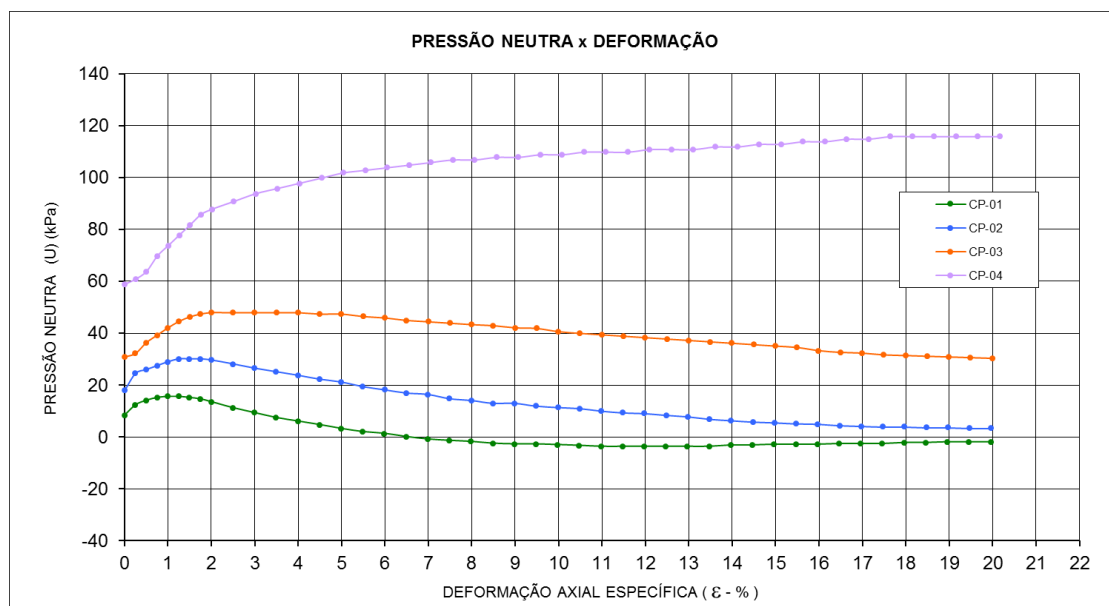
Fonte: Autora.

**Figura 163 – Amostra 3 - Filito - hótima + 4% – Ensaio UU não saturado.**

Fonte: Autora.

**Figura 164** – Amostra 3 - Filito - hótima + 4% – Ensaio UU não saturado.

Fonte: Autora.

**Figura 165** – Amostra 3 - Filito - hótima + 4% – Ensaio UU não saturado.

Fonte: Autora.

**Tabela 45** – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  – Ensaio UU não saturado.

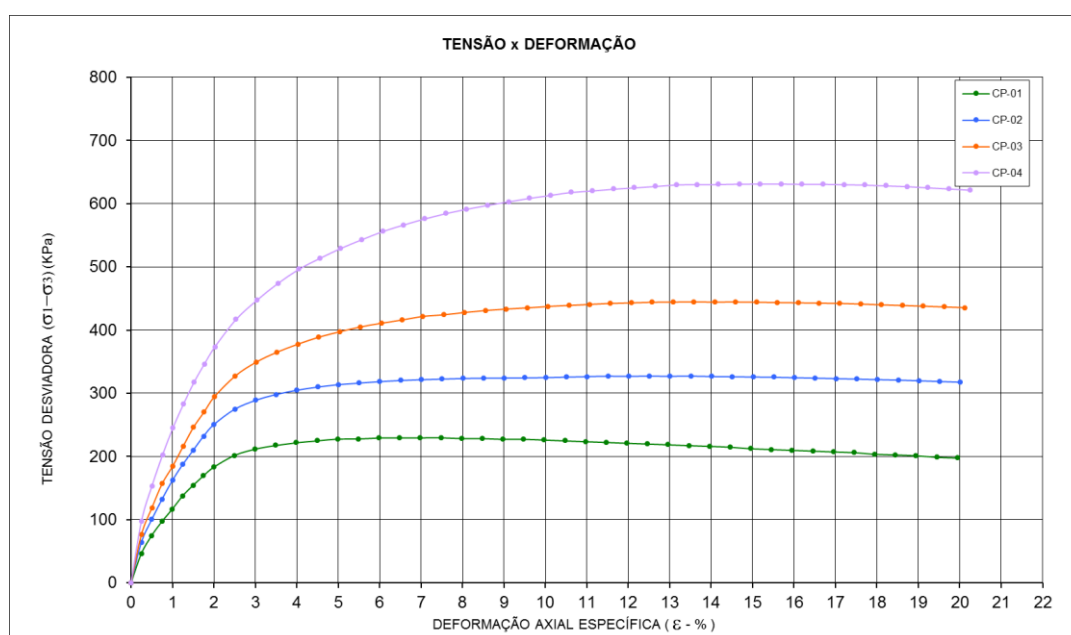
Amostra 3 - Litologia: Filito - hótima+4%				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	206,50	103,25	1,00	10.325
100	276,62	138,31	0,95	14.559
200	438,87	219,44	1,25	17.555
400	648,80	324,40	1,30	24.954

Fonte: Autora

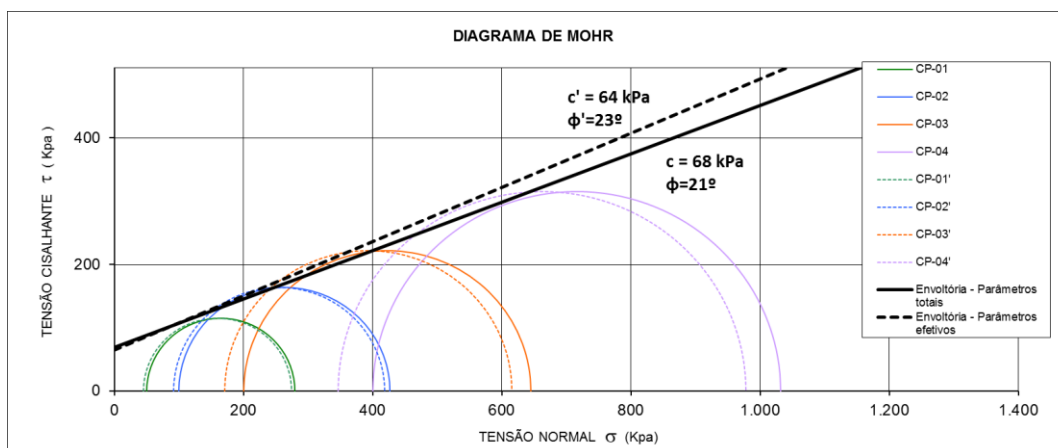
**Tabela 46 - Amostra 4 – Ultramilonito - hótima – Ensaio UU não saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	19,04	18,69	18,72	18,72
Grau de saturação (%)	57	56	56	57
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	14,61	14,67	14,66	14,67
Índice de Vazios	0,95	0,94	0,94	0,94
$\Delta h$ (%)	0,14	0,59	0,62	0,62
GC	94,7%	95,0%	95,0%	95,1%

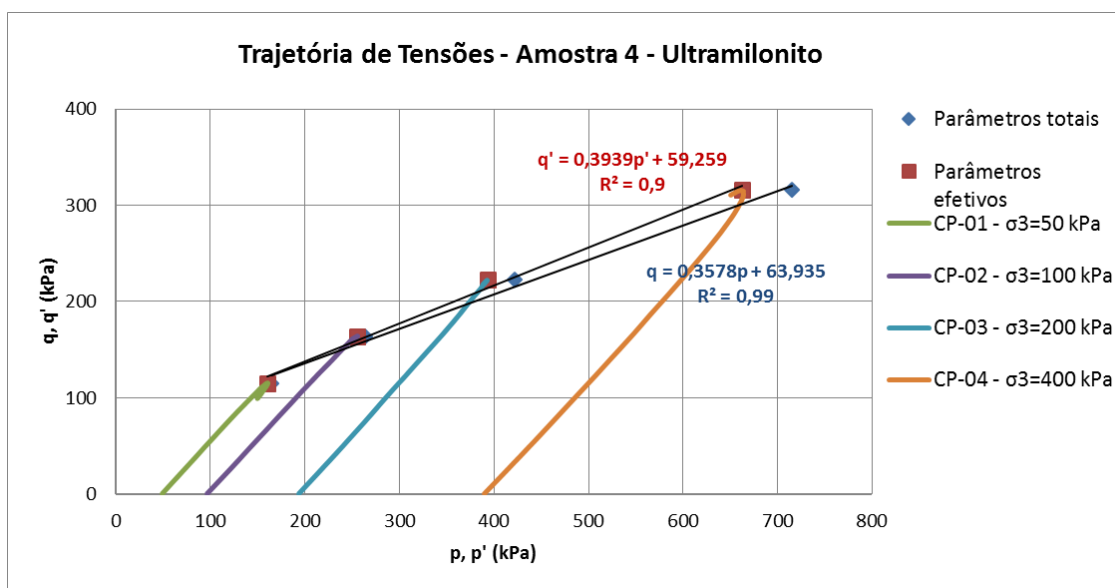
Fonte: Autora.

**Figura 166 – Amostra 4 – Ultramilonito - hótima – Ensaio UU não saturado.**

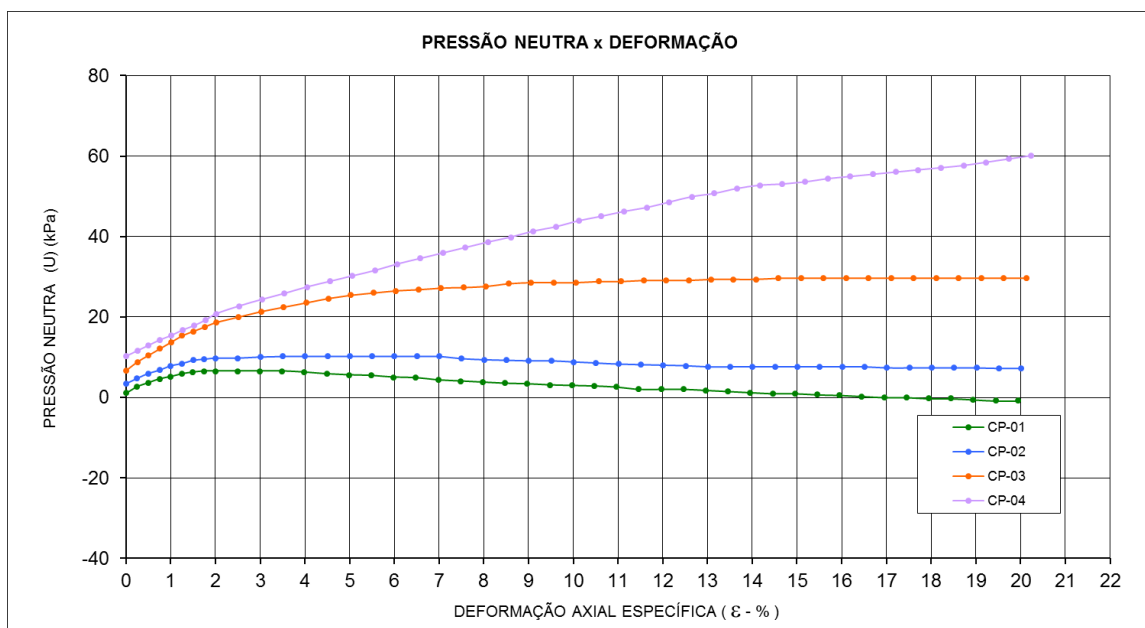
Fonte: Autora.

**Figura 167 – Amostra 4 - Ultramilonito - hótima – Ensaio UU não saturado.**

Fonte: Autora.

**Figura 168** – Amostra 4 - Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.

Fonte: Autora.

**Figura 169** – Amostra 4 - Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.

Fonte: Autora.

**Tabela 47** – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  – Ensaio UU não saturado.

Amostra 4 - Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub>				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	230	114,79	1,00	11.479
100	327	163,32	1,00	16.332
200	445	222,36	1,30	17.104
400	631	315,72	1,52	20.771

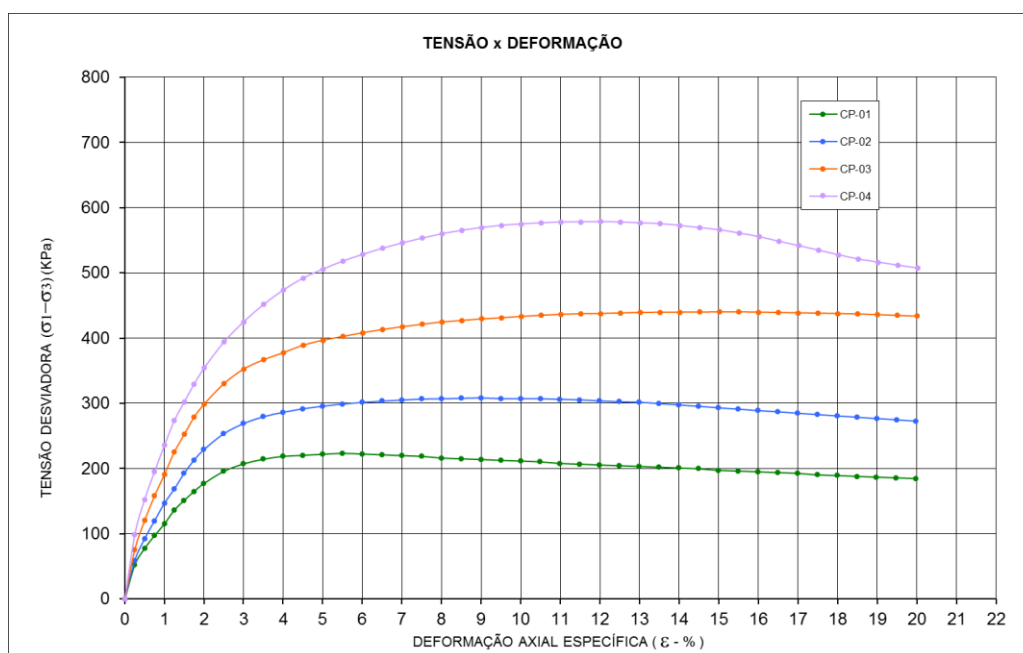
Fonte: Autora



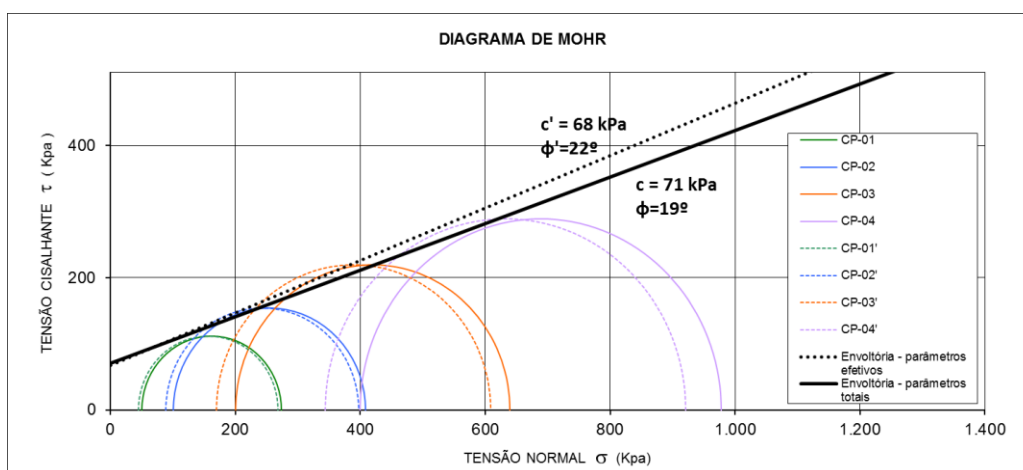
**Tabela 48 - Amostra 4 – Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	20,71	20,68	20,68	20,63
Grau de saturação (%)	62	62	62	62
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	14,65	14,67	14,67	14,67
Índice de Vazios	0,94	0,94	0,94	0,94
$\Delta h$ (%)	1,81	1,78	1,78	1,73
GC	95,0%	95,0%	95,0%	95,1%

Fonte: Autora.

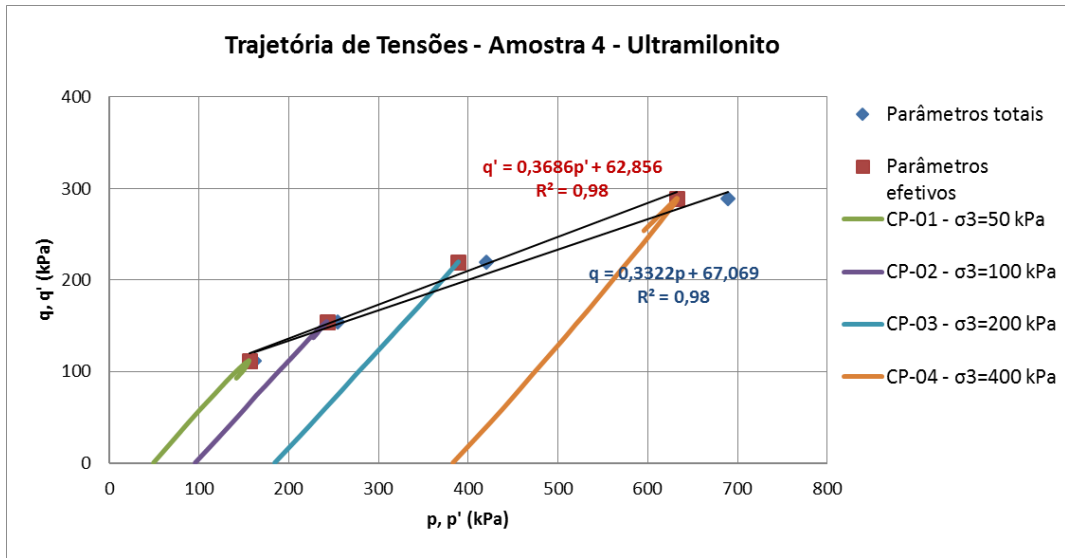
**Figura 170 – Amostra 4 – Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado.**

Fonte: Autora.

**Figura 171 – Amostra 4 – Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado.**

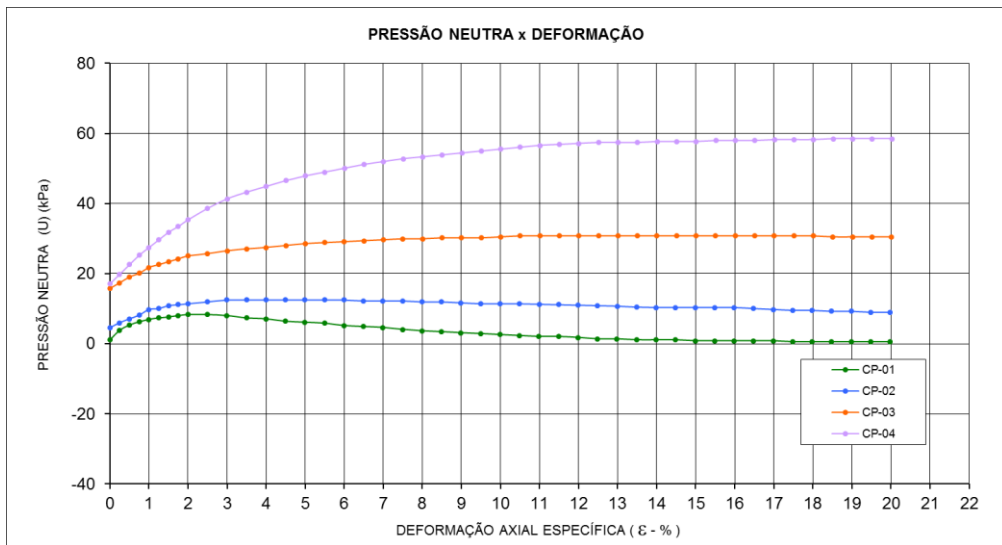
Fonte: Autora.

**Figura 172 – Amostra 4 - Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Figura 173 – Amostra 4 - Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Tabela 49 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$ . – Ensaio UU não saturado.**

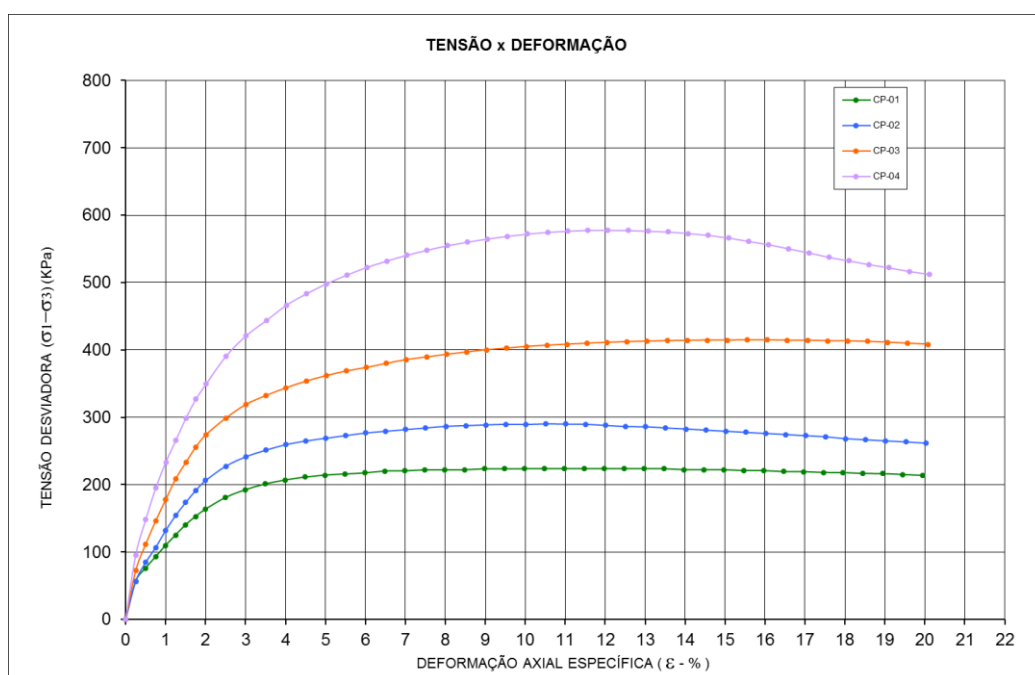
Amostra 4 - Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> +2%				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	224	111,79	1,00	11.179
100	309	154,28	1,00	15.428
200	440	219,82	1,20	18.319
400	578	289,00	1,40	20.643

Fonte: Autora

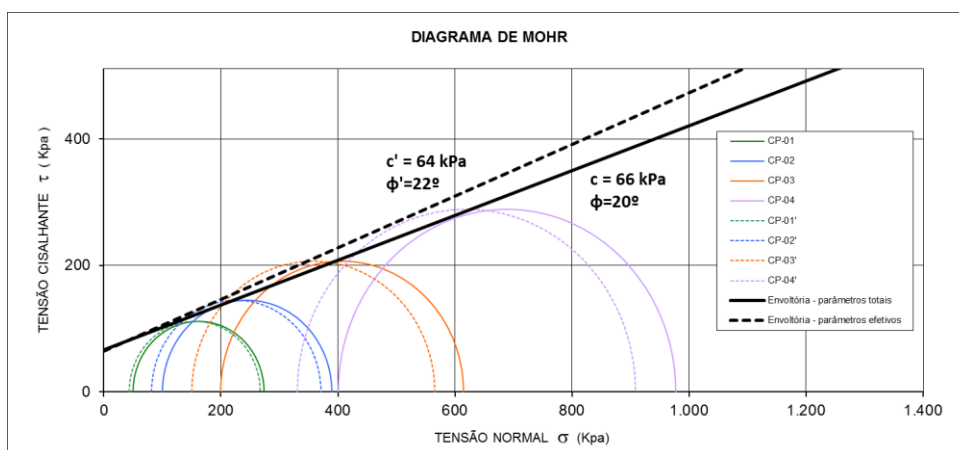
**Tabela 50** - Amostra 4 – Ultramilonito -  $h_{ótima} + 4\%$  – Ensaio UU não saturado.

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	22,62	22,63	22,66	22,81
Grau de saturação (%)	68	68	68	69
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	14,66	14,67	14,66	14,66
Índice de Vazios	0,94	0,94	0,94	0,94
$\Delta h$ (%)	3,72	3,73	3,76	3,91
GC	95,0%	95,1%	95,0%	95,0%

Fonte: Autora.

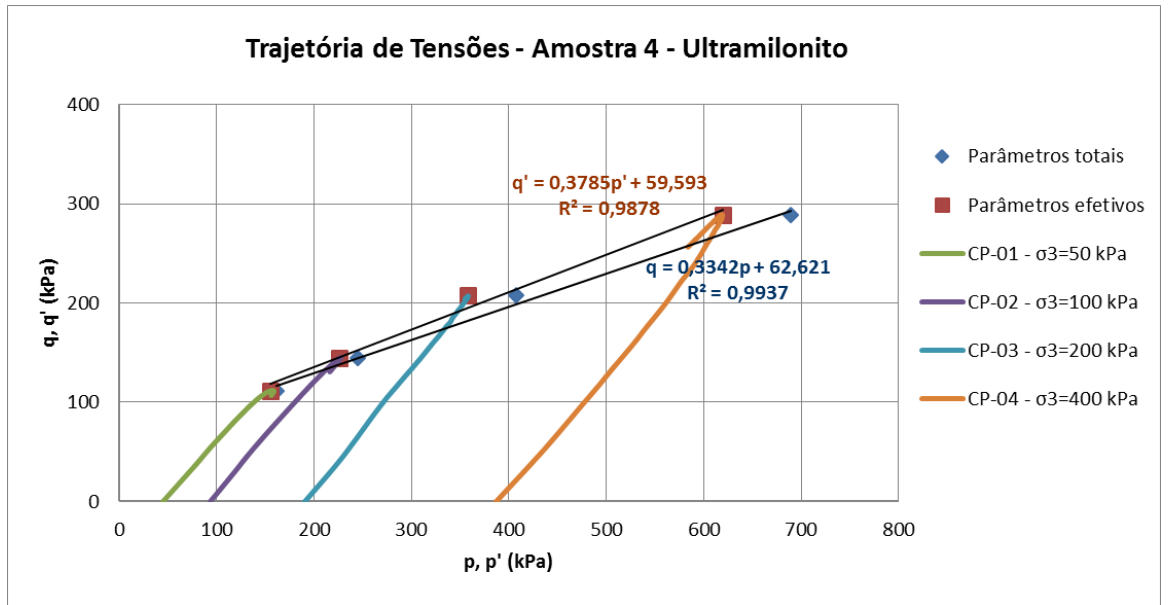
**Figura 174** – Amostra 4 – Ultramilonito -  $h_{ótima} + 4\%$  – Ensaio UU não saturado.

Fonte: Autora.

**Figura 175** – Amostra 4 - Ultramilonito -  $h_{ótima} + 4\%$  – Ensaio UU não saturado.

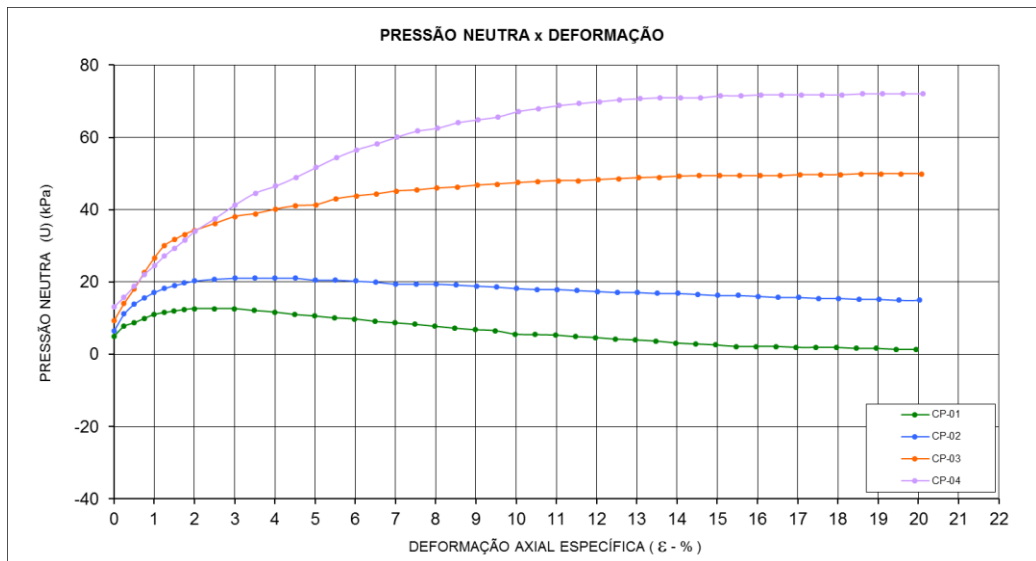
Fonte: Autora.

**Figura 176 – Amostra 4 - Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Figura 177 – Amostra 4 - Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Tabela 51 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante E<sub>50</sub> – Ensaio UU não saturado.**

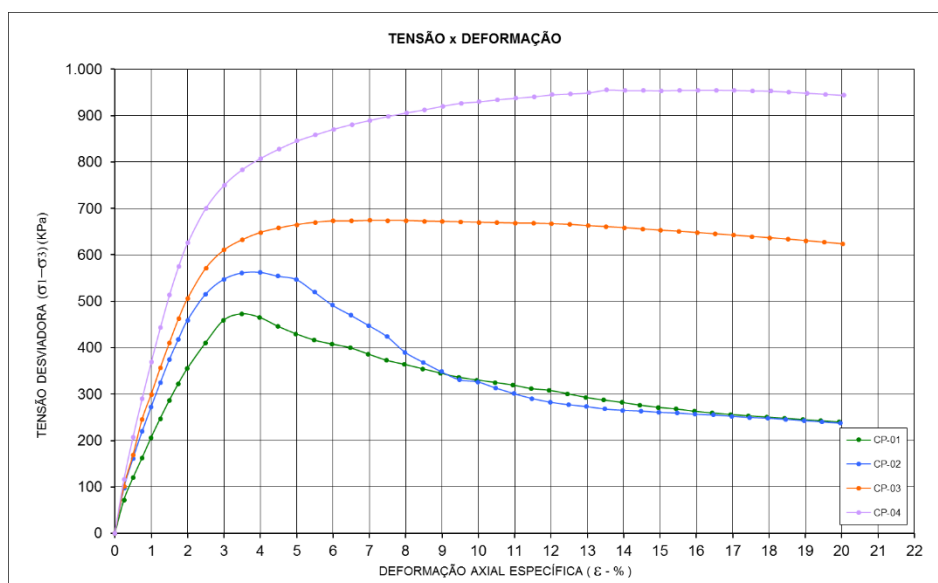
Amostra 4 - Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> +4%				
σ <sub>3</sub> (kPa)	σ <sub>1</sub> -σ <sub>3</sub> (kPa)	1/2*(σ <sub>1</sub> -σ <sub>3</sub> )(kPa)	ε (%)	E <sub>50</sub> (kPa)
50	223,52	111,76	1,00	11.176
100	289,75	144,88	1,10	13.171
200	414,70	207,35	1,25	16.588
400	577,54	288,77	1,45	19.915

Fonte: Autora

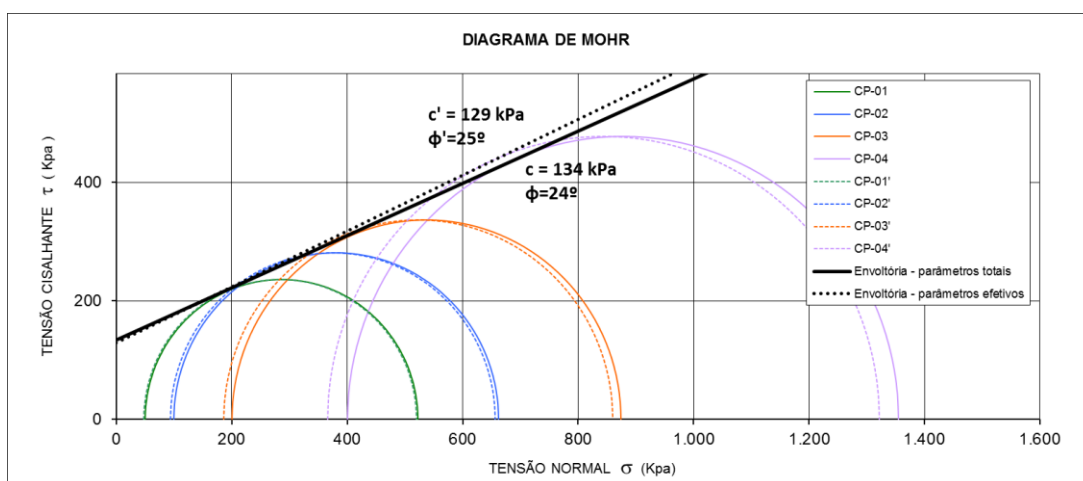
**Tabela 52 - Amostra 5 – Metabásica - hótima – Ensaio UU não saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	21,71	21,71	21,76	21,84
Grau de saturação (%)	55	56	56	56
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	13,71	13,72	13,73	13,73
Índice de Vazios	1,16	1,16	1,16	1,16
$\Delta h$ (%)	-0,29	-0,29	-0,24	-0,16
GC	95,2%	95,3%	95,3%	95,3%

Fonte: Autora.

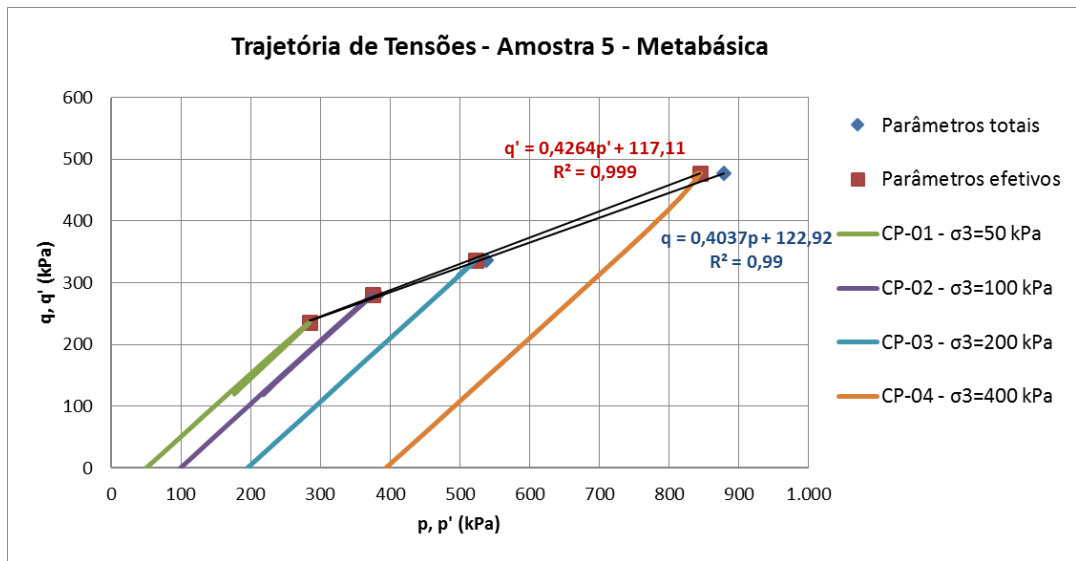
**Figura 178 – Amostra 5 – Metabásica - hótima – Ensaio UU não saturado.**

Fonte: Autora.

**Figura 179 – Amostra 5 - Metabásica - hótima – Ensaio UU não saturado.**

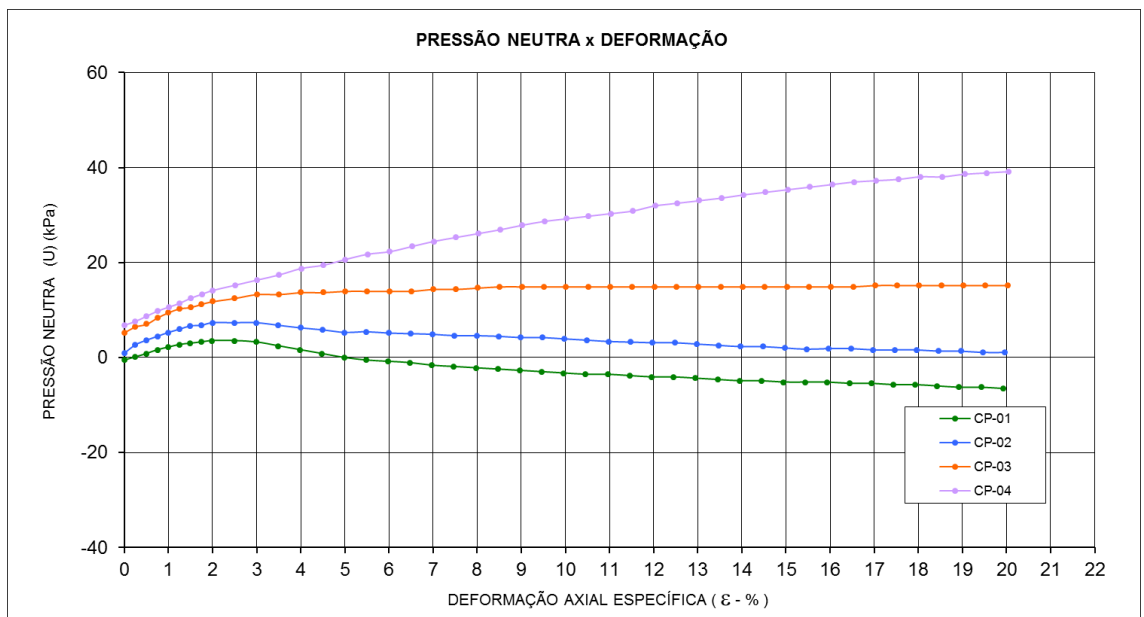
Fonte: Autora.

**Figura 180** – Amostra 5 - Metabásica - hótima – Ensaio UU não saturado.



Fonte: Autora.

**Figura 181** – Amostra 5 - Metabásica - hótima – Ensaio UU não saturado.



Fonte: Autora.

**Tabela 53** – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  – Ensaio UU não saturado.

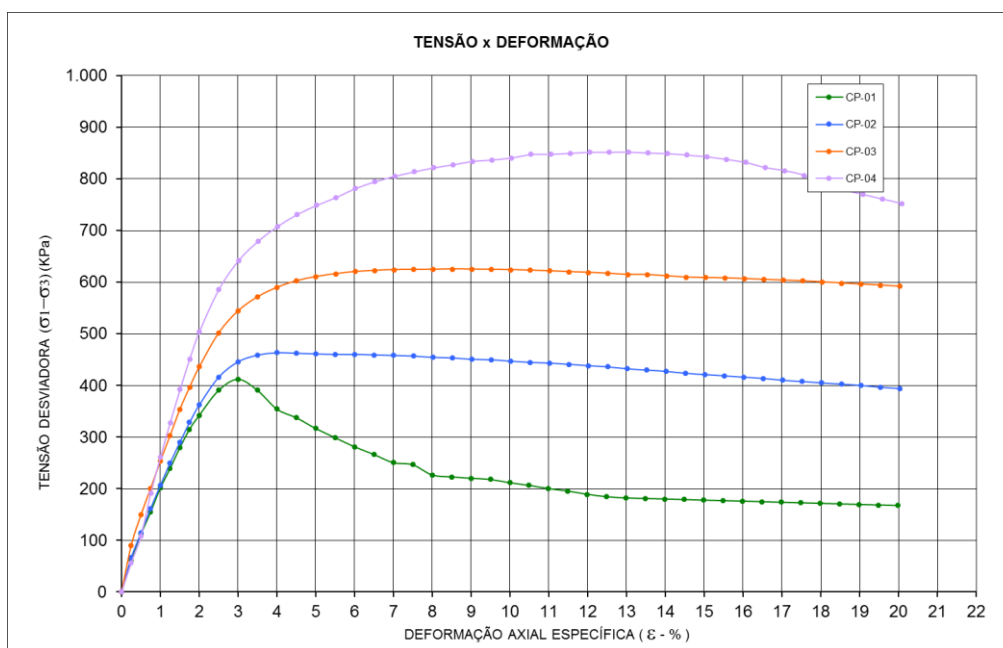
Amostra 5 - Litologia: Metabásica - hótima				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	472,69	236,34	1,25	18.907
100	562,45	281,22	1,05	26.783
200	674,10	337,05	1,20	28.088
400	955,22	477,61	1,50	31.841

Fonte: Autora

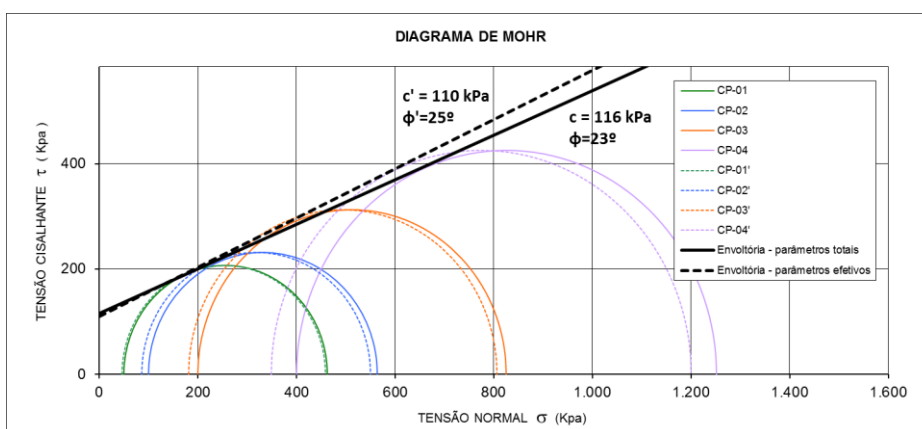
**Tabela 54 - Amostra 5 – Metabásica -  $h_{ótima}+2\%$  – Ensaio UU não saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	23,72	23,76	24,07	23,78
Grau de saturação (%)	61	61	61	61
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	13,71	13,71	13,69	13,69
Índice de Vazios	1,16	1,16	1,16	1,16
$\Delta h$ (%)	1,72	1,76	2,07	1,78
GC	95,2%	95,2%	95,0%	95,0%

Fonte: Autora.

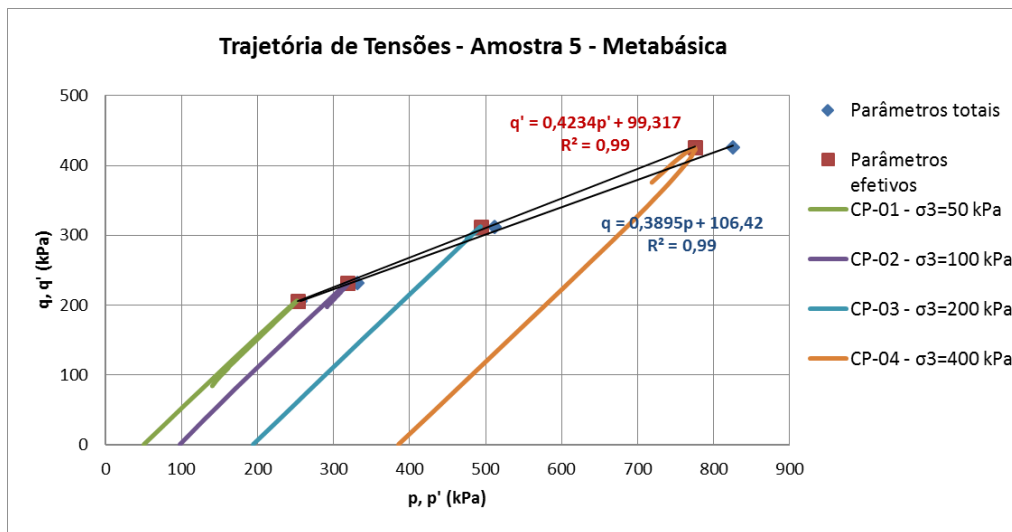
**Figura 182 – Amostra 5 – Metabásica -  $h_{ótima} + 2\%$  – Ensaio UU não saturado.**

Fonte: Autora.

**Figura 183 – Amostra 5 - Metabásica -  $h_{ótima} + 2\%$  – Ensaio UU não saturado.**

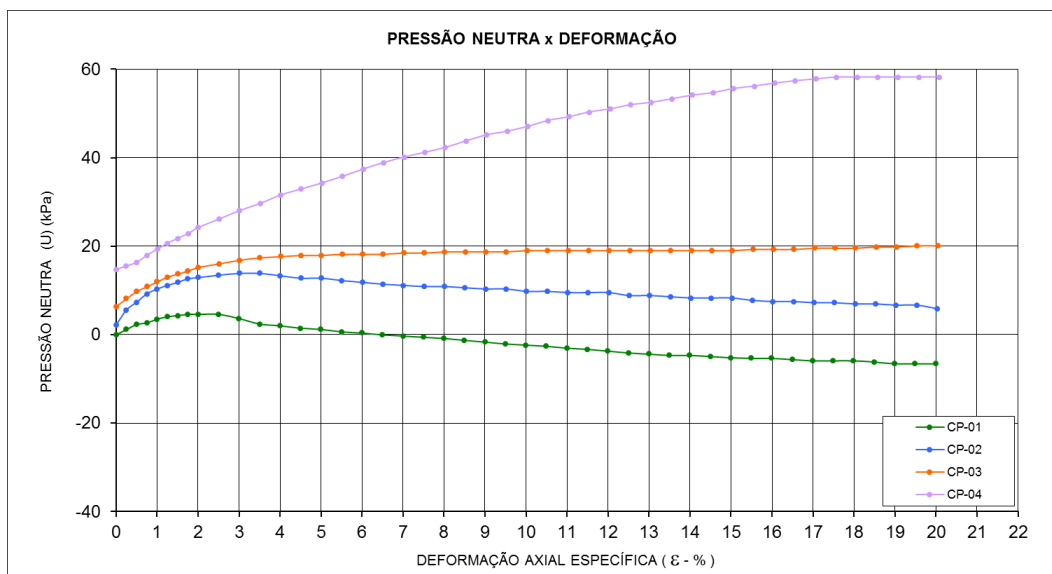
Fonte: Autora.

**Figura 184 – Amostra 5 - Metabásica - h<sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Figura 185 – Amostra 5 - Metabásica - h<sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Tabela 55 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  – Ensaio UU não saturado.**

Amostra 5 - Litologia: Metabásica - h <sub>ótima</sub> +2%				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	412,35	206,18	1,00	20.618
100	463,33	231,67	1,15	20.145
200	624,59	312,30	1,25	24.984
400	851,60	425,80	1,60	26.613

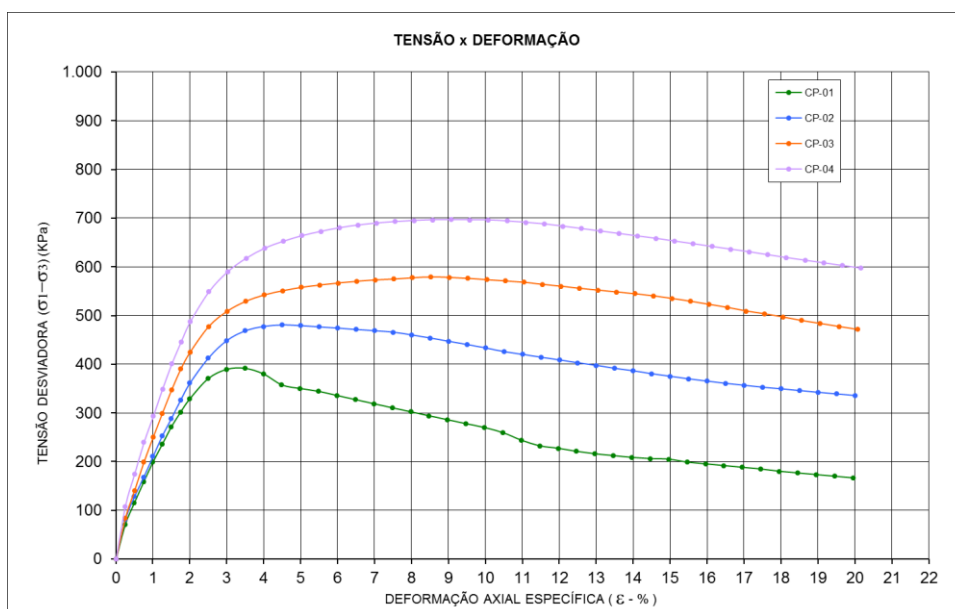
Fonte: Autora



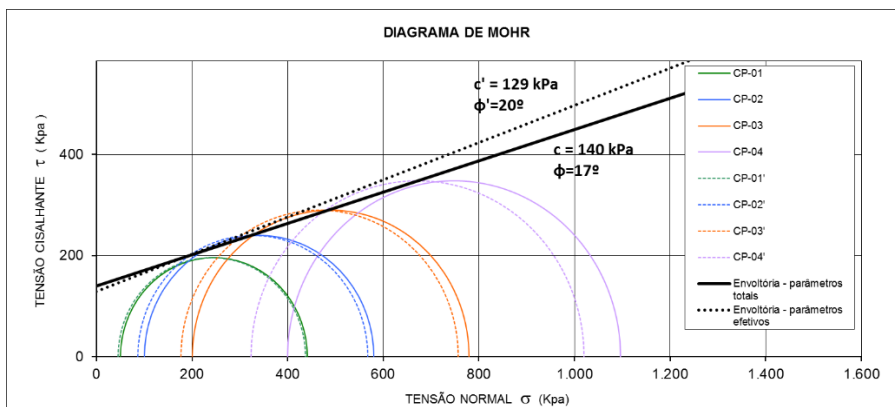
**Tabela 56** - Amostra 5 – Metabásica -  $h_{ótima}+4\%$  – Ensaio UU não saturado.

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	26,09	26,14	26,22	26,22
Grau de saturação (%)	66	66	67	67
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	13,68	13,68	13,66	13,65
Índice de Vazios	1,16	1,16	1,17	1,17
$\Delta h$ (%)	4,09	4,14	4,22	4,22
GC	95,0%	95,0%	94,9%	94,8%

Fonte: Autora.

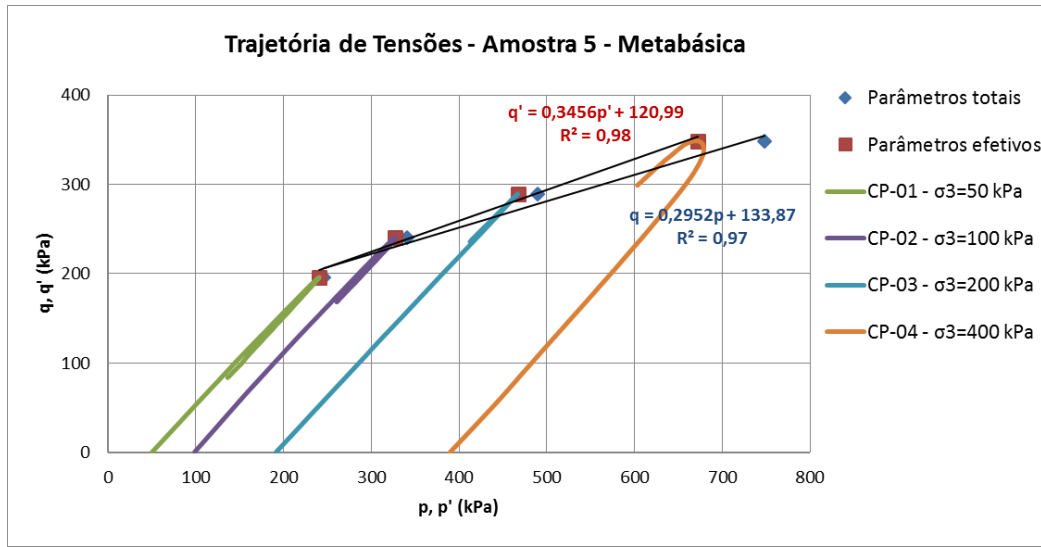
**Figura 186** – Amostra 5 – Metabásica -  $h_{ótima} + 4\%$  – Ensaio UU não saturado.

Fonte: Autora.

**Figura 187** – Amostra 5 - Metabásica -  $h_{ótima} + 4\%$  – Ensaio UU não saturado.

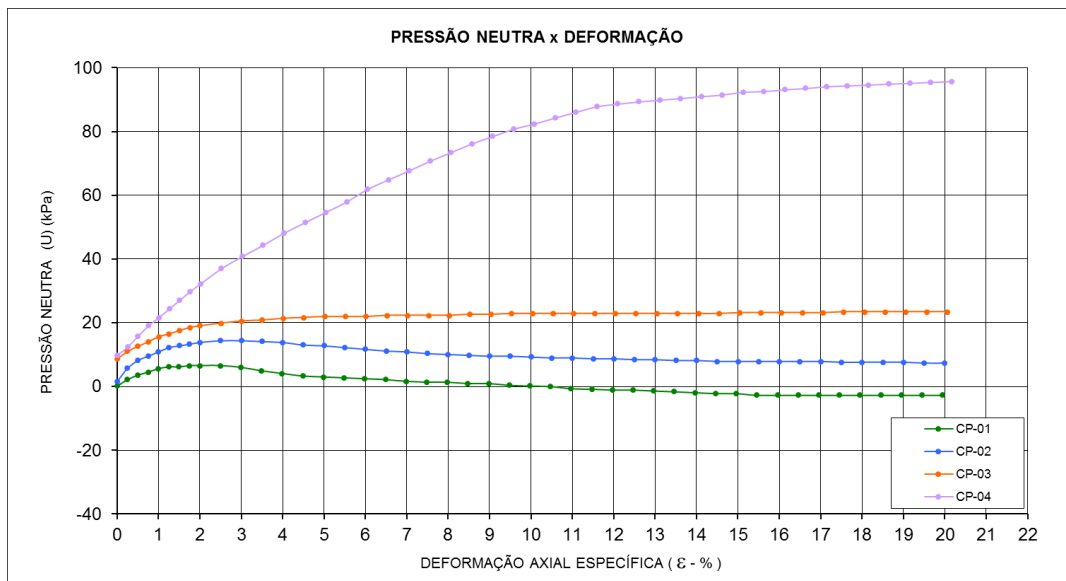
Fonte: Autora.

**Figura 188 – Amostra 5 - Metabásica - h<sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Figura 189 – Amostra 5 - Metabásica - h<sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Tabela 57 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante E<sub>50</sub> – Ensaio UU não saturado.**

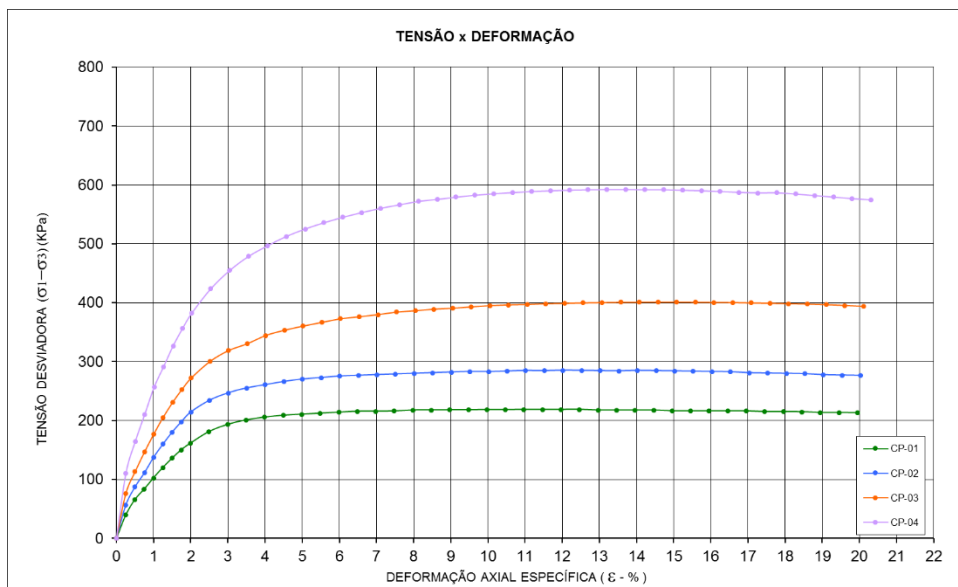
Amostra 5 - Litologia: Metabásica - h <sub>ótima</sub> +4%				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1-\sigma_3$ (kPa)	$1/2*(\sigma_1-\sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	E <sub>50</sub> (kPa)
50	391,73	195,87	1,00	19.587
100	480,72	240,36	1,15	20.901
200	579,03	289,51	1,10	26.319
400	696,55	348,28	1,25	27.862

Fonte: Autora

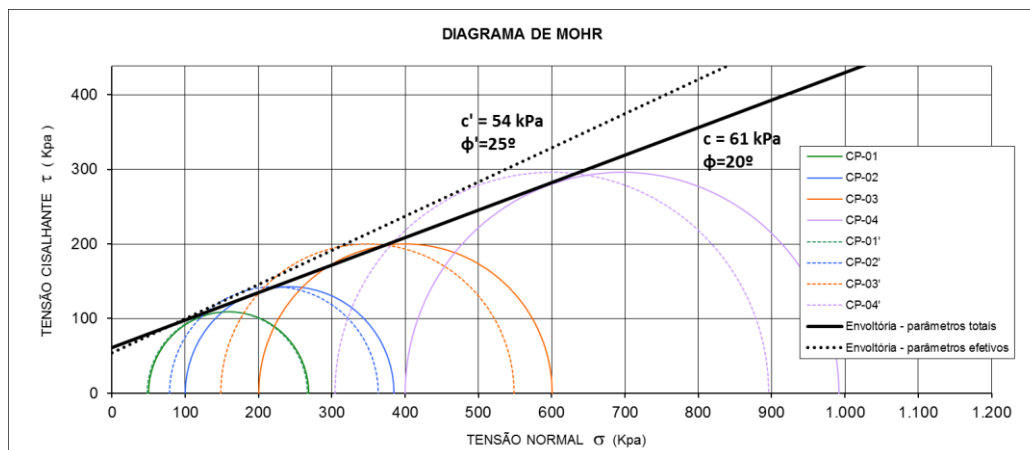
**Tabela 58** - Amostra 6 – Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	22,84	22,89	22,75	22,81
Grau de saturação (%)	72	72	72	72
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	14,85	14,85	14,87	14,85
Índice de Vazios	0,88	0,89	0,88	0,88
$\Delta h$ (%)	-0,36	-0,31	-0,45	-0,39
GC	95,2%	95,2%	95,3%	95,2%

Fonte: Autora.

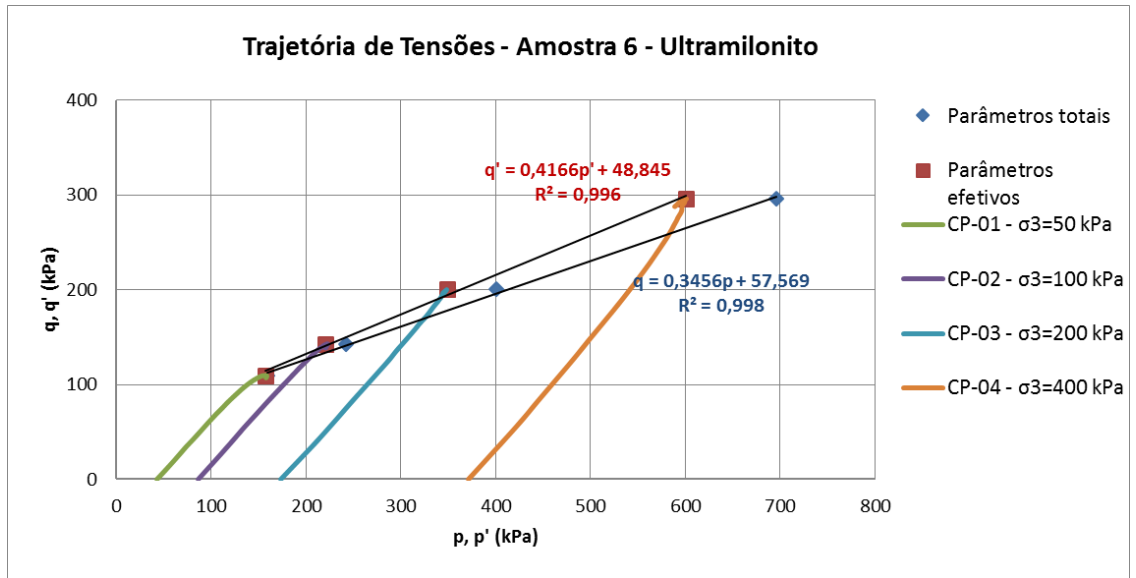
**Figura 190** – Amostra 6 – Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.

Fonte: Autora.

**Figura 191** – Amostra 6 – Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.

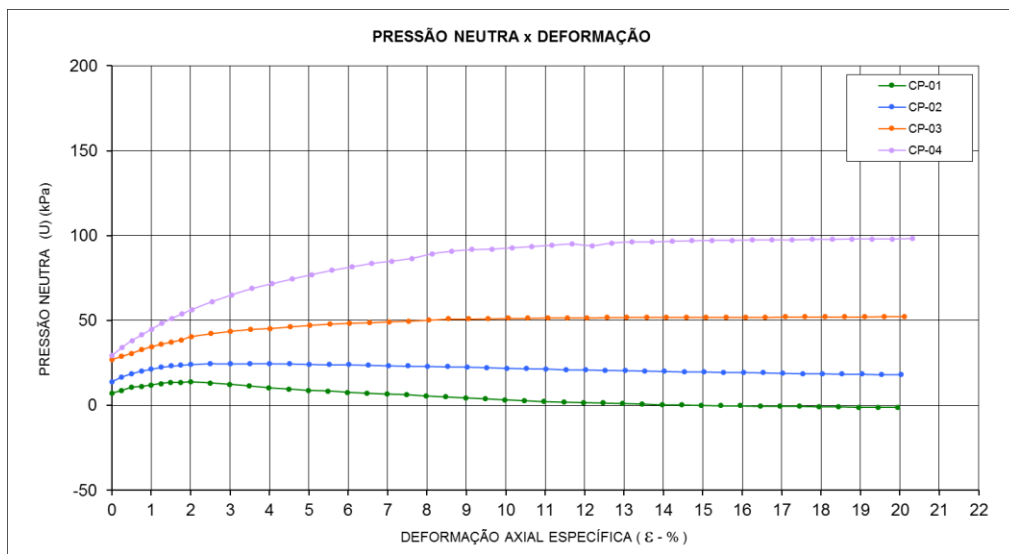
Fonte: Autora.

**Figura 192 – Amostra 6 – Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Figura 193 – Amostra 6 – Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Tabela 59 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  – Ensaio UU não saturado.**

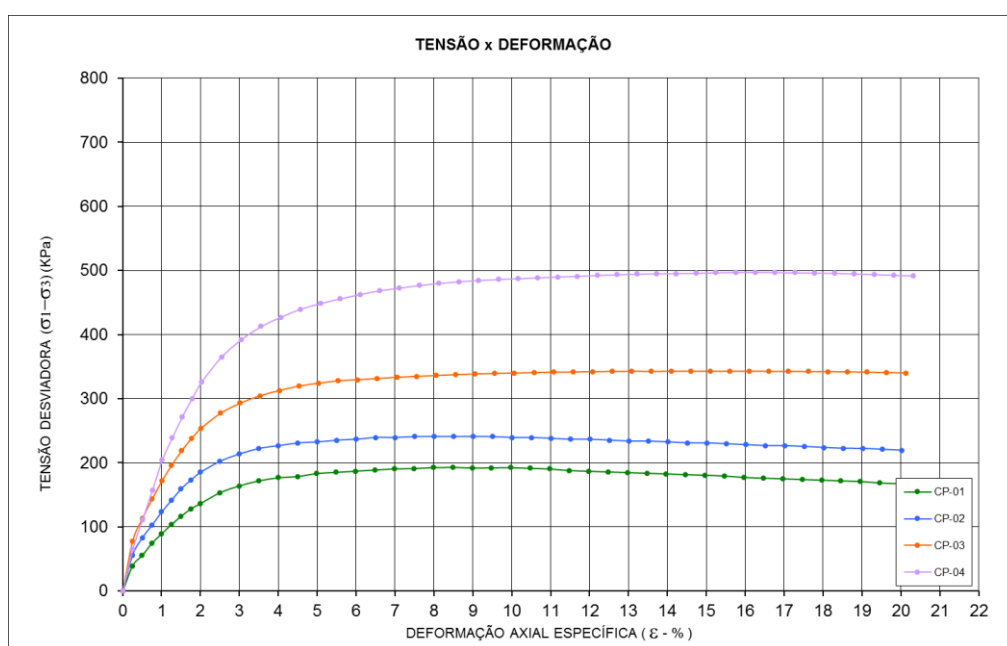
Amostra 6 - Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub>				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	218,50	109,25	1,10	9.932
100	284,75	142,38	1,05	13.560
200	400,79	200,39	1,20	16.699
400	591,72	295,86	1,30	22.758

Fonte: Autora

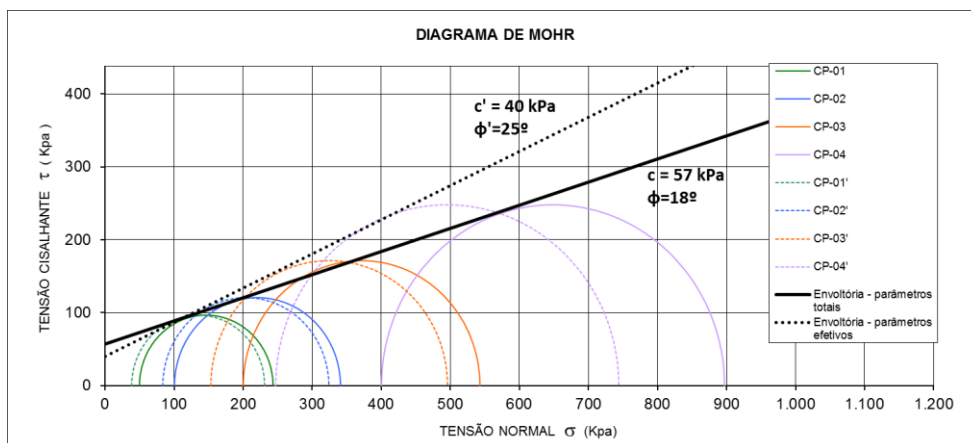
**Tabela 60** - Amostra 6 – Ultramilonito -  $h_{ótima} + 2\%$  – Ensaio UU não saturado.

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Unidade média (%)	25,15	25,14	25,12	25,25
Grau de saturação (%)	79	79	79	80
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	14,82	14,82	14,82	14,82
Índice de Vazios	0,89	0,89	0,89	0,89
$\Delta h$ (%)	1,95	1,94	1,92	2,05
GC	95,0%	95,0%	95,0%	95,0%

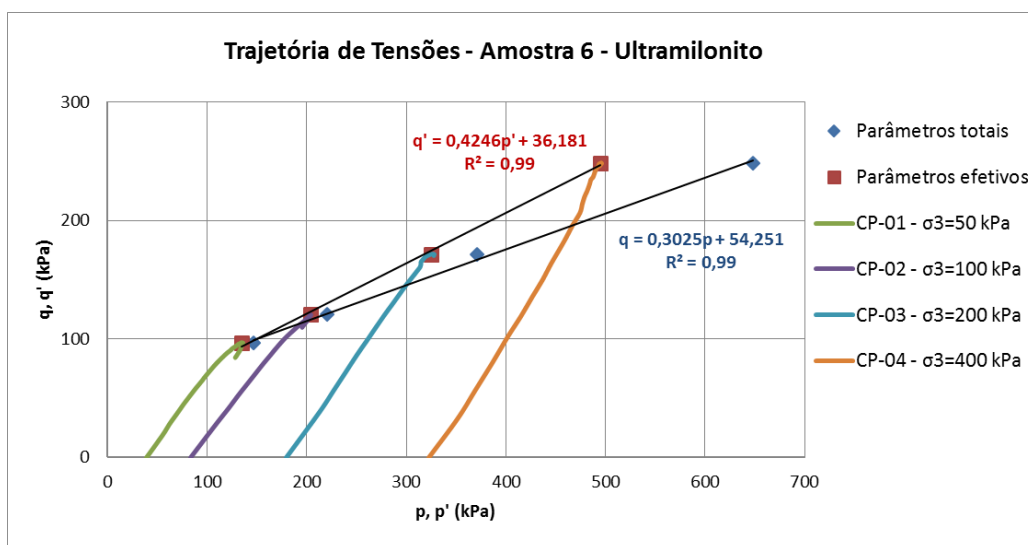
Fonte: Autora.

**Figura 194** – Amostra 6 – Ultramilonito -  $h_{ótima} + 2\%$  – Ensaio UU não saturado.

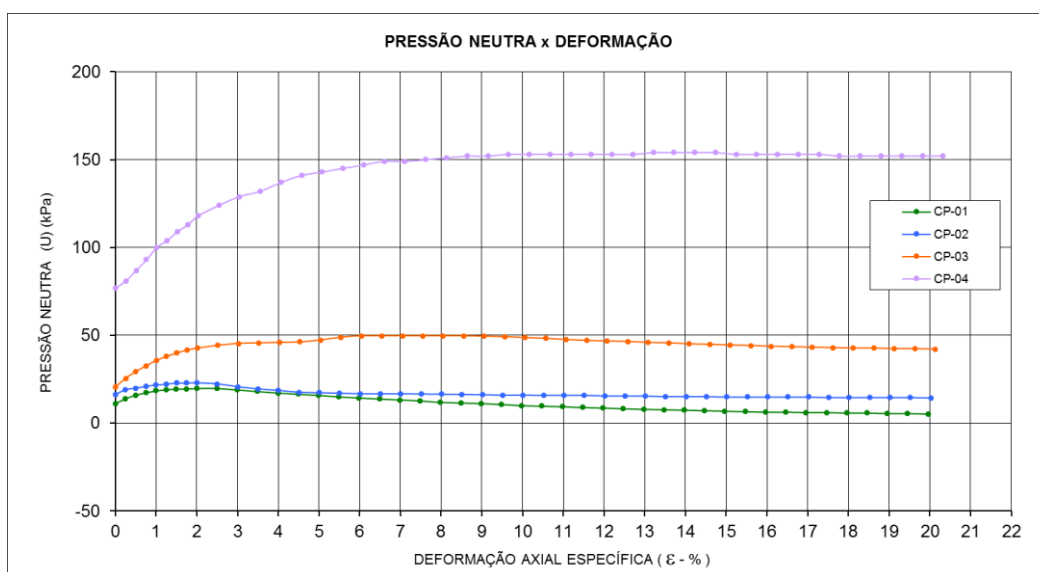
Fonte: Autora.

**Figura 195** – Amostra 6 – Ultramilonito -  $h_{ótima} + 2\%$  – Ensaio UU não saturado.

Fonte: Autora.

**Figura 196** – Amostra 6 – Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado.

Fonte: Autora.

**Figura 197** – Amostra 6 – Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> + 2% – Ensaio UU não saturado.

Fonte: Autora.

**Tabela 61** – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  – Ensaio UU não saturado.

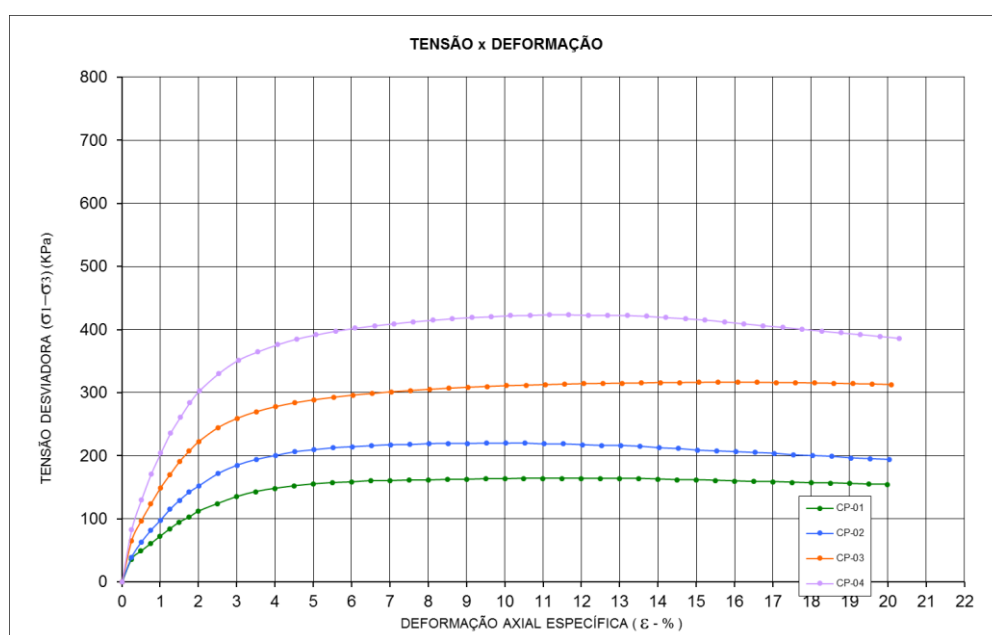
Amostra 6 - Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> +2%				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	192,78	96,39	1,10	8.763
100	240,76	120,38	1,00	12.038
200	342,59	171,29	1,00	17.129
400	496,70	248,35	1,30	19.104

Fonte: Autora

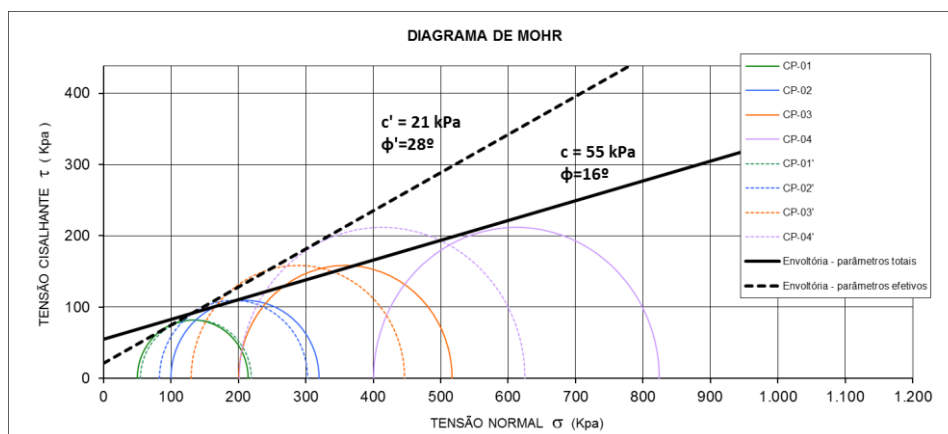
**Tabela 62 - Amostra 6 – Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio UU não saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	26,96	26,94	27,00	26,90
Grau de saturação (%)	85	85	85	85
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	14,85	14,85	14,84	14,85
Índice de Vazios	0,88	0,89	0,89	0,88
$\Delta h$ (%)	3,76	3,74	3,80	3,70
GC	95,2%	95,2%	95,1%	95,2%

Fonte: Autora.

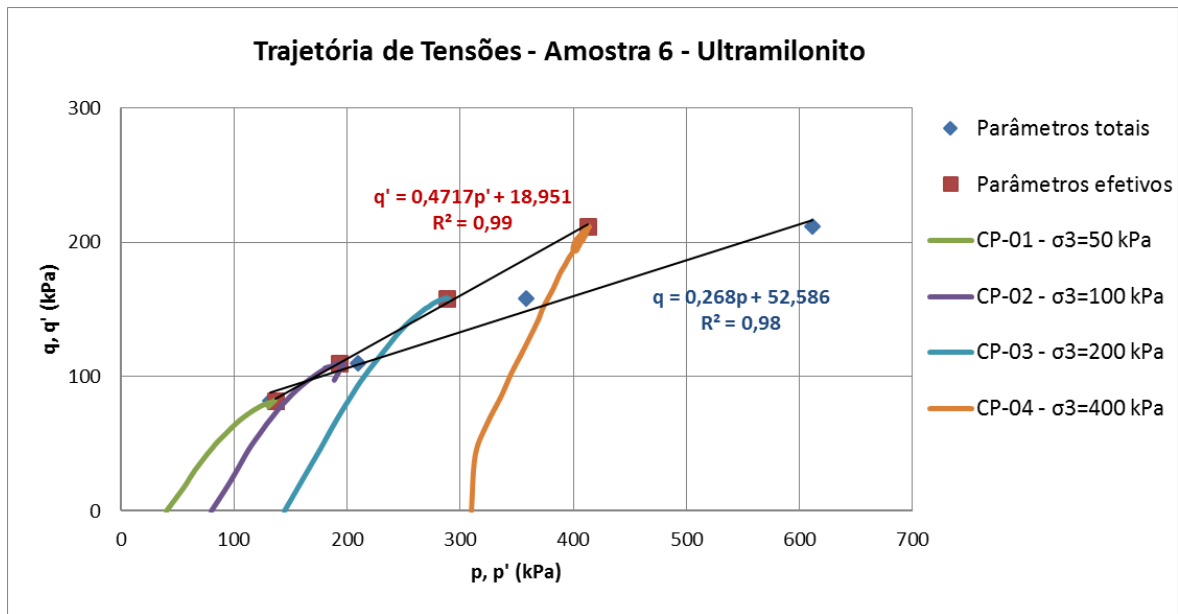
**Figura 198 – Amostra 6 – Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio UU não saturado.**

Fonte: Autora.

**Figura 199 – Amostra 6 – Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio UU não saturado.**

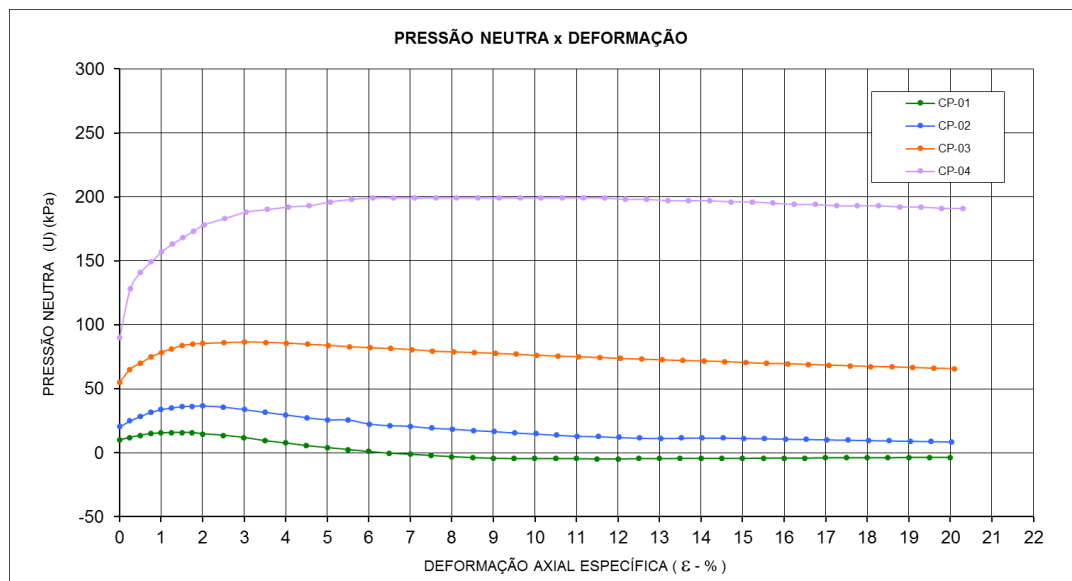
Fonte: Autora.

**Figura 200 – Amostra 6 – Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Figura 201 – Amostra 6 – Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> + 4% – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Tabela 63 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  – Ensaio UU não saturado.**

Amostra 6 - Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> +4%				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	164,10	82,05	1,25	6.564
100	219,62	109,81	1,20	9.151
200	316,52	158,26	1,15	13.762
400	423,75	211,88	1,10	19.261

Fonte: Autora

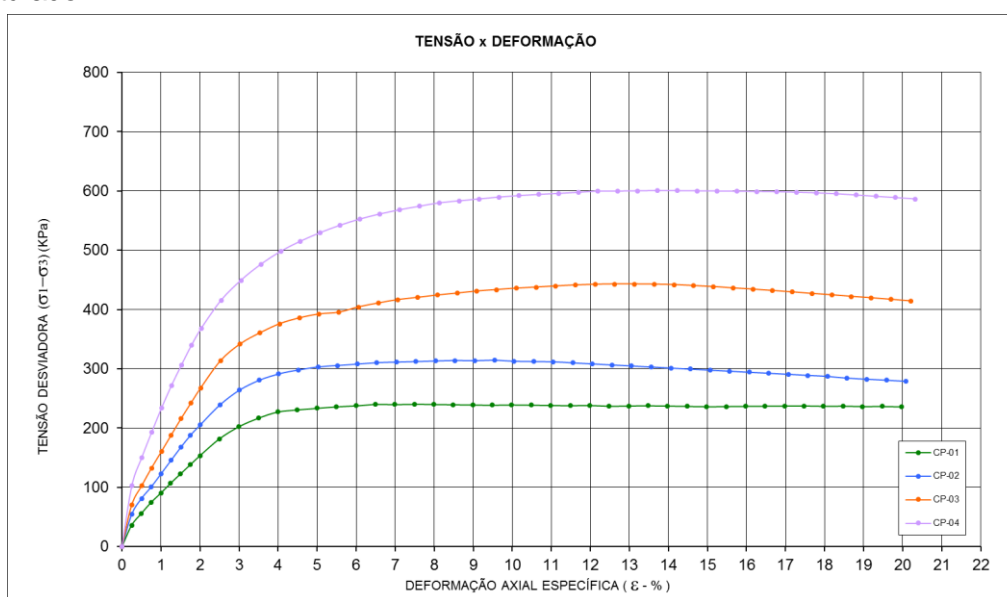


**Tabela 64 - Amostra 7 – Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima}$  – Ensaio UU não saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	28,82	28,54	28,64	28,43
Grau de saturação (%)	72	71	71	71
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	13,04	13,06	13,06	13,07
Índice de Vazios	1,10	1,10	1,10	1,10
$\Delta h$ (%)	0,02	-0,26	-0,16	-0,37
GC	95,0%	95,2%	95,2%	95,3%

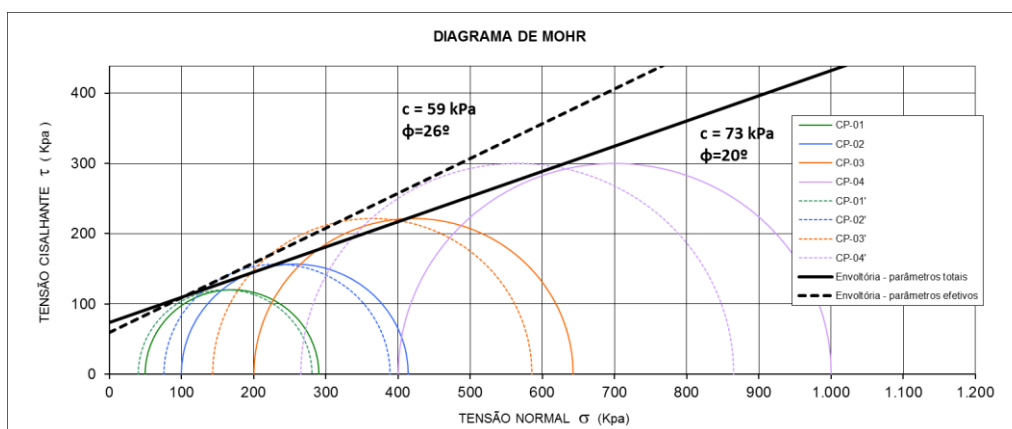
**Fonte:** Autora.

**Figura 202 – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima}$  – Ensaio UU não saturado.**



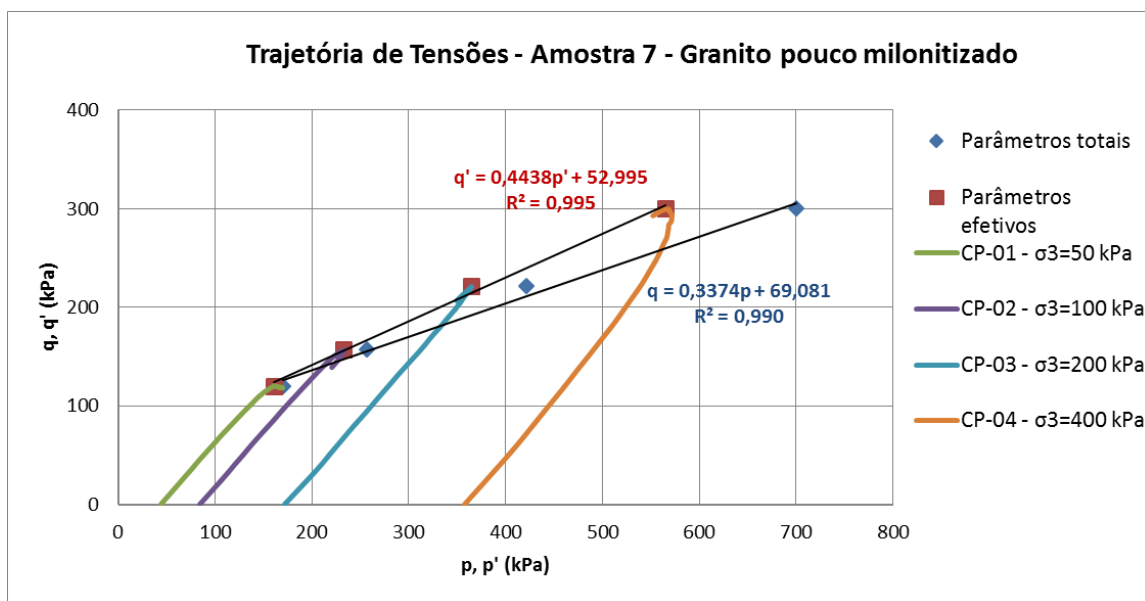
**Fonte:** Autora.

**Figura 203 – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima}$  – Ensaio UU não saturado.**



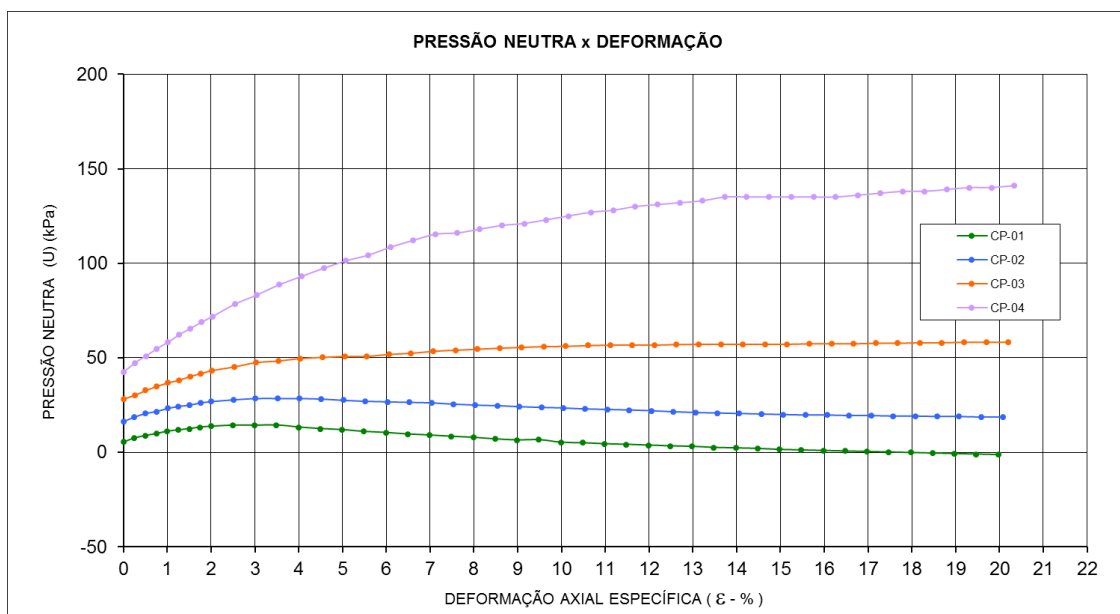
**Fonte:** Autora.

**Figura 204** – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado - h<sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.



Fonte: Autora.

**Figura 205** – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado - h<sub>ótima</sub> – Ensaio UU não saturado.



Fonte: Autora.

**Tabela 65** – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  – Ensaio UU não saturado.

Amostra 7 - Litologia: Granito pouco milonitizado - h <sub>ótima</sub>				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	240,07	120,04	1,50	8.002
100	314,08	157,04	1,30	12.080
200	442,98	221,49	1,50	14.766
400	600,57	300,28	1,50	20.019

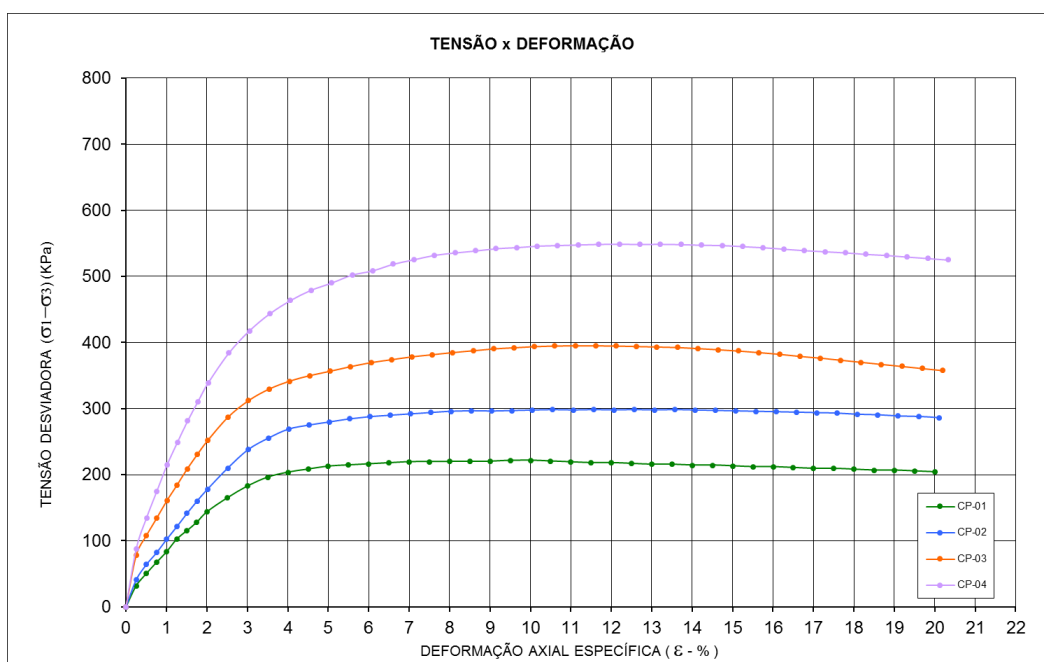
Fonte: Autora

**Tabela 66** - Amostra 7 – Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima}+2\%$  – Ensaio UU não saturado.

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	30,63	30,54	30,47	30,56
Grau de saturação (%)	76	76	76	76
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	13,05	13,07	13,07	13,07
Índice de Vazios	1,10	1,10	1,10	1,10
$\Delta h$ (%)	1,83	1,74	1,67	1,76
GC	95,1%	95,3%	95,3%	95,3%

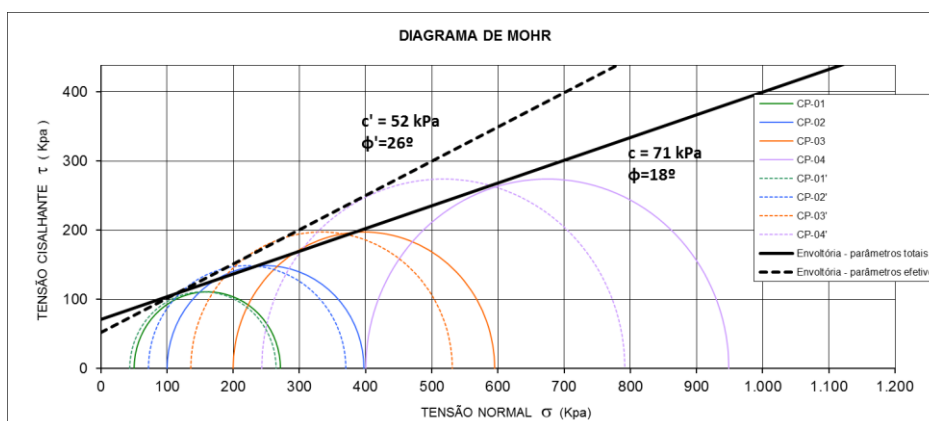
Fonte: Autora.

**Figura 206** – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima} + 2\%$  – Ensaio UU não saturado.



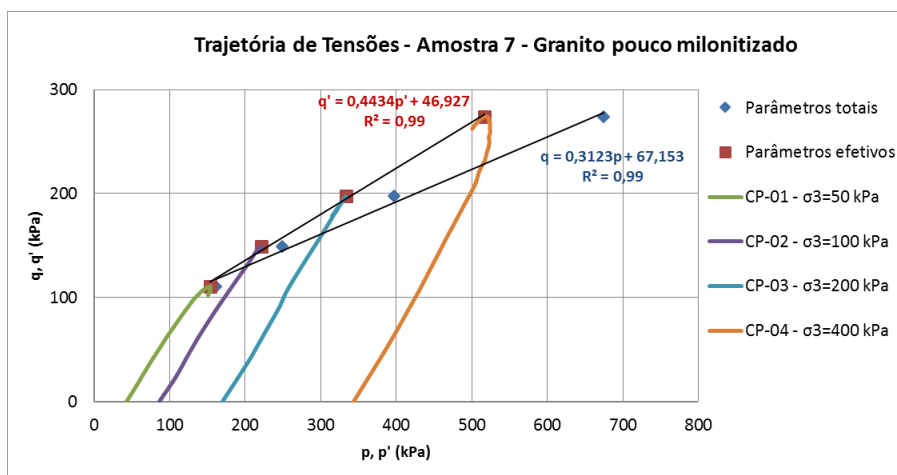
Fonte: Autora.

**Figura 207** – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima} + 2\%$  – Ensaio UU não saturado.



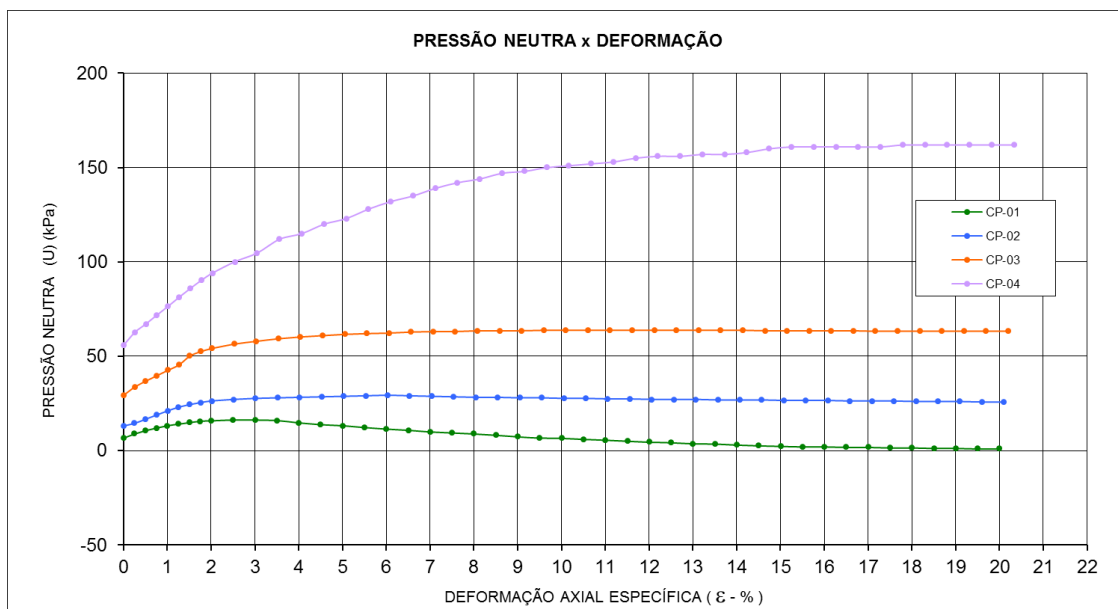
Fonte: Autora.

**Figura 208** – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima} + 2\%$  – Ensaio UU não saturado.



Fonte: Autora.

**Figura 209** – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima} + 2\%$  – Ensaio UU não saturado.



Fonte: Autora.

**Tabela 67** – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  – Ensaio UU não saturado.

Amostra 7 - Litologia: Granito pouco milonitizado - $h_{ótima}+2\%$				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1-\sigma_3$ (kPa)	$1/2*(\sigma_1-\sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	221,58	110,79	1,50	7.386
100	297,65	148,82	1,50	9.922
200	394,72	197,36	1,30	15.182
400	548,44	274,22	1,45	18.912

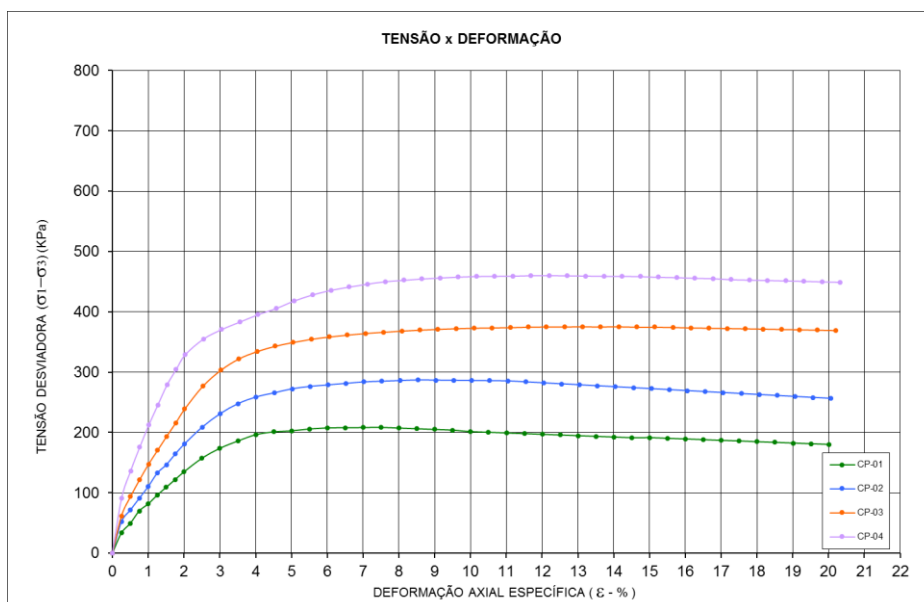
Fonte: Autora

**Tabela 68 - Amostra 7 – Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima}+4\%$  – Ensaio UU não saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	33,02	33,02	33,08	32,98
Grau de saturação (%)	82	82	82	82
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	13,02	13,02	13,00	13,03
Índice de Vazios	1,11	1,10	1,11	1,10
$\Delta h$ (%)	4,22	4,22	4,28	4,18
GC	94,9%	94,9%	94,8%	95,0%

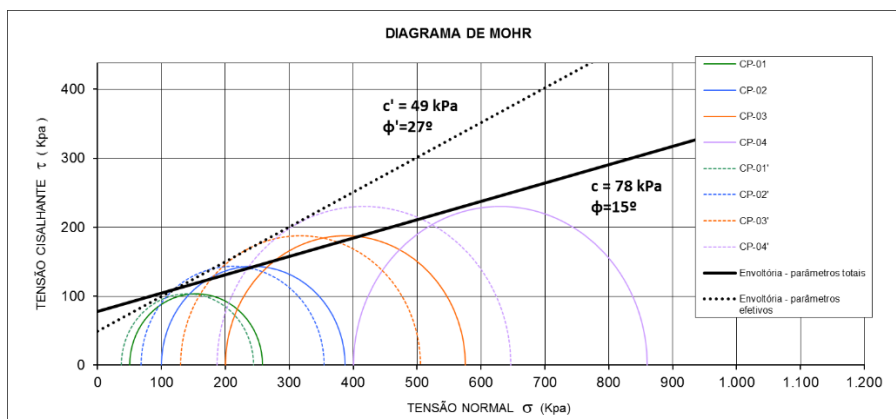
Fonte: Autora.

**Figura 210 – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima} + 4\%$  – Ensaio UU não saturado.**



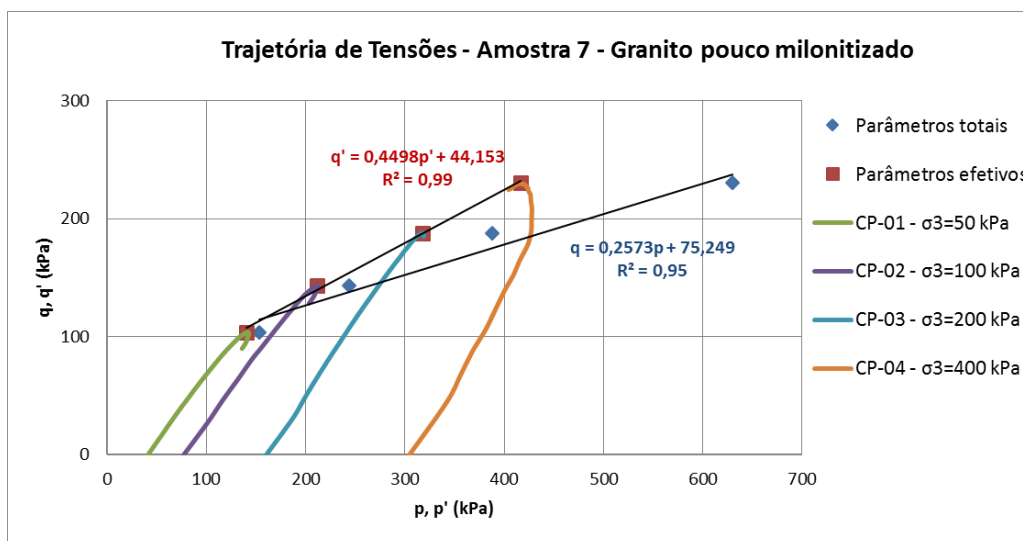
Fonte: Autora.

**Figura 211 – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima} + 4\%$  – Ensaio UU não saturado.**



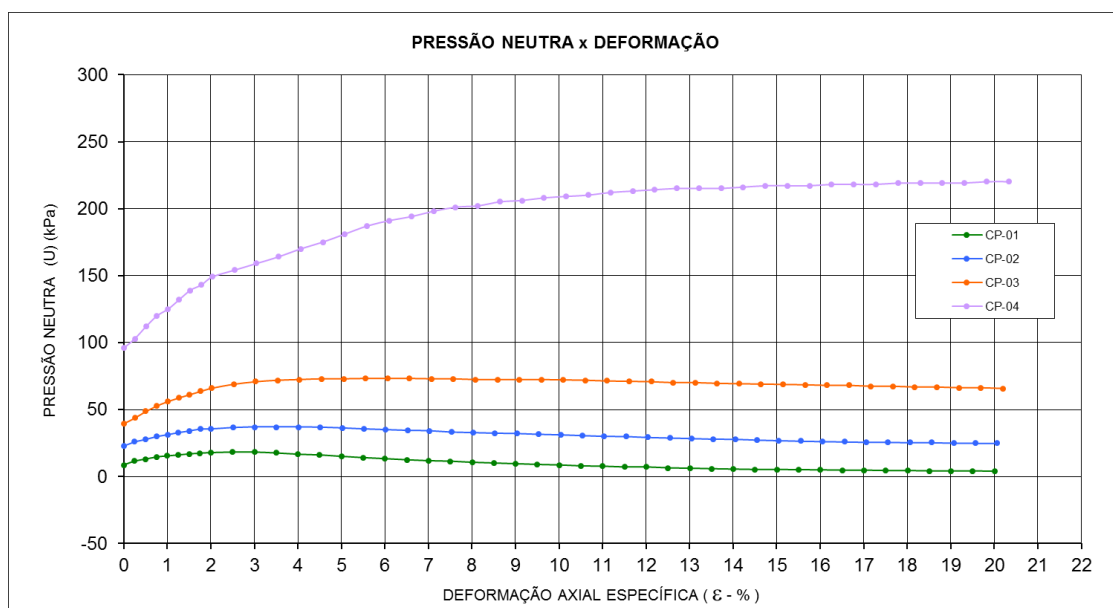
Fonte: Autora.

**Figura 212 – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima} + 4\%$  – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Figura 213 – Amostra 7 – Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima} + 4\%$  – Ensaio UU não saturado.**



Fonte: Autora.

**Tabela 69 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  – Ensaio UU não saturado.**

Amostra 7 - Litologia: Granito pouco milonitizado - $h_{ótima}+4\%$				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1-\sigma_3$ (kPa)	$1/2*(\sigma_1-\sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	207,60	103,80	1,35	7.689
100	287,02	143,51	1,50	9.567
200	375,52	187,76	1,50	12.517
400	460,14	230,07	1,15	20.006

Fonte: Autora

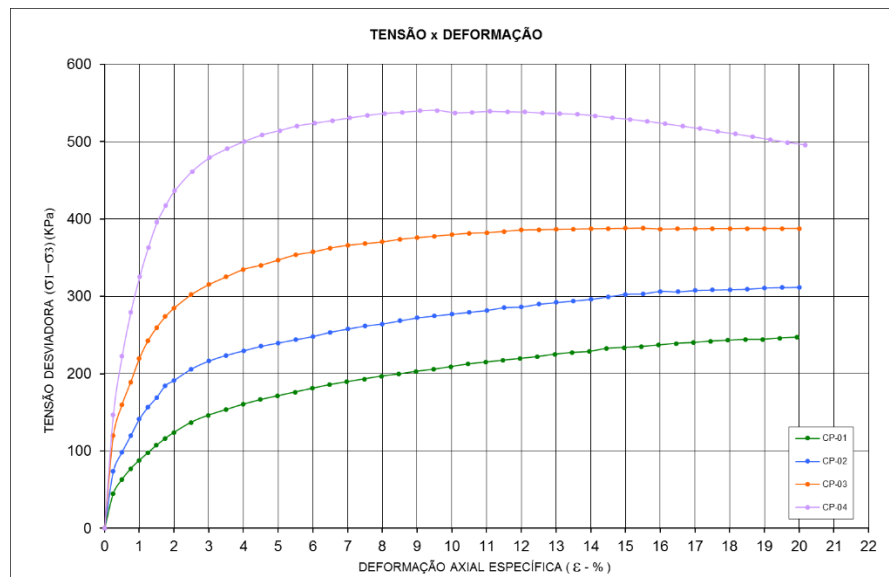
## APÊNDICE D – ENSAIOS TRIAXIAIS CU SATURADO

**Tabela 70 - Amostra 2 – Filito - h<sub>ótima</sub>+2% - Ensaio CU saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	19,93	19,86	19,88	19,85
Grau de saturação (%)	73	73	73	73
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	15,88	15,89	15,89	15,89
Índice de Vazios	0,77	0,76	0,76	0,76
$\Delta h$ (%)	1,83	1,76	1,78	1,75
GC	95,2%	95,3%	95,3%	95,3%

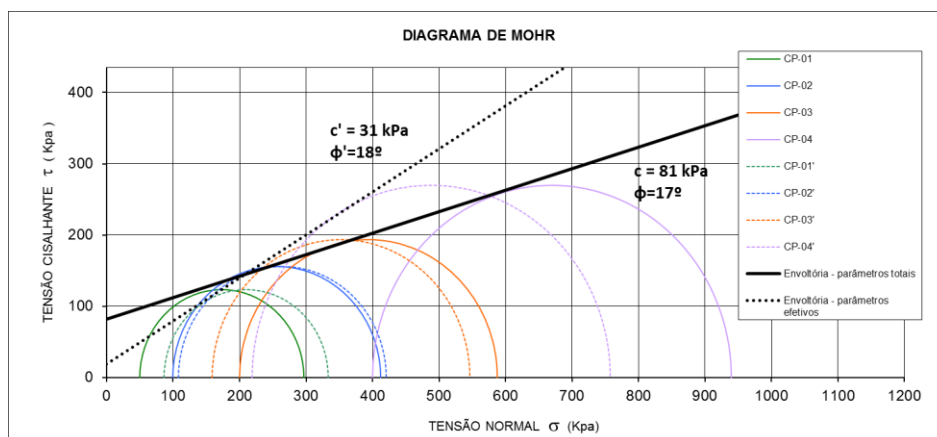
Fonte: Autora.

**Figura 214 – Amostra 2 – Filito - h<sub>ótima</sub> +2% - Ensaio CU saturado.**



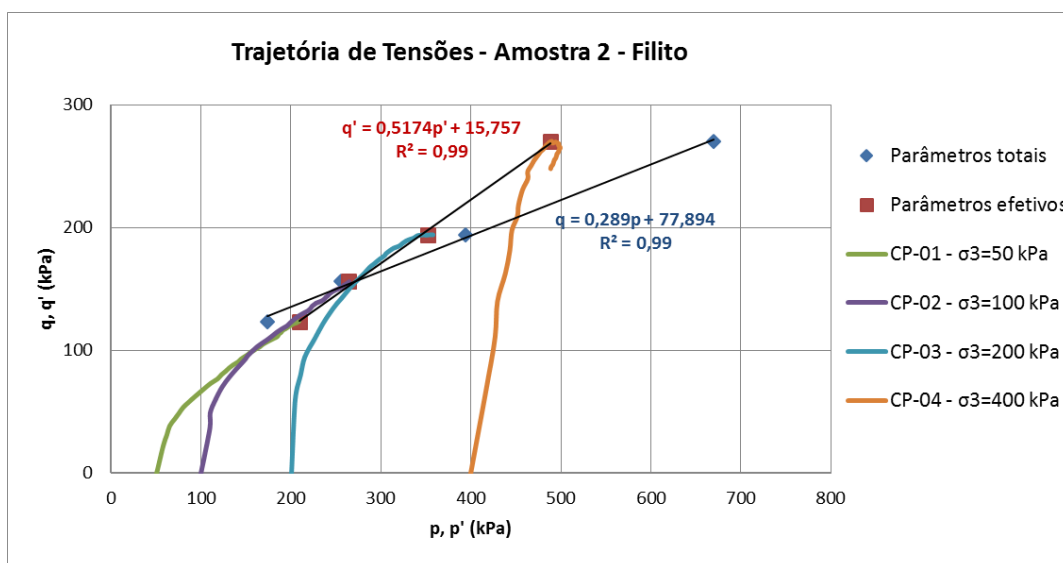
Fonte: Autora.

**Figura 215 – Amostra 2 - Filito - h<sub>ótima</sub> +2% - Ensaio CU saturado.**



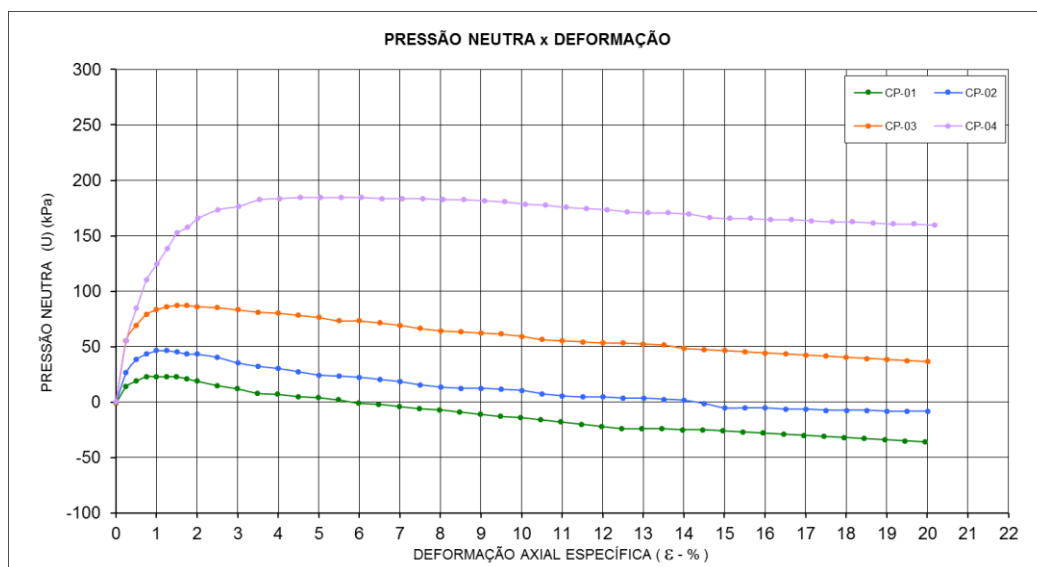
Fonte: Autora.

**Figura 216 – Amostra 2 - Filito - hótima +2% - Ensaio CU saturado.**



Fonte: Autora.

**Figura 217 – Amostra 2 - Filito - hótima +2% - Ensaio CU saturado.**



Fonte: Autora.

**Tabela 71 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  - Ensaio CU saturado.**

Amostra 2 - Litologia: Filito - hótima+2%				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	246,90	123,45	2,00	6.173
100	311,84	155,92	1,35	11.550
200	387,54	193,77	0,80	24.221
400	539,69	269,85	0,70	38.550

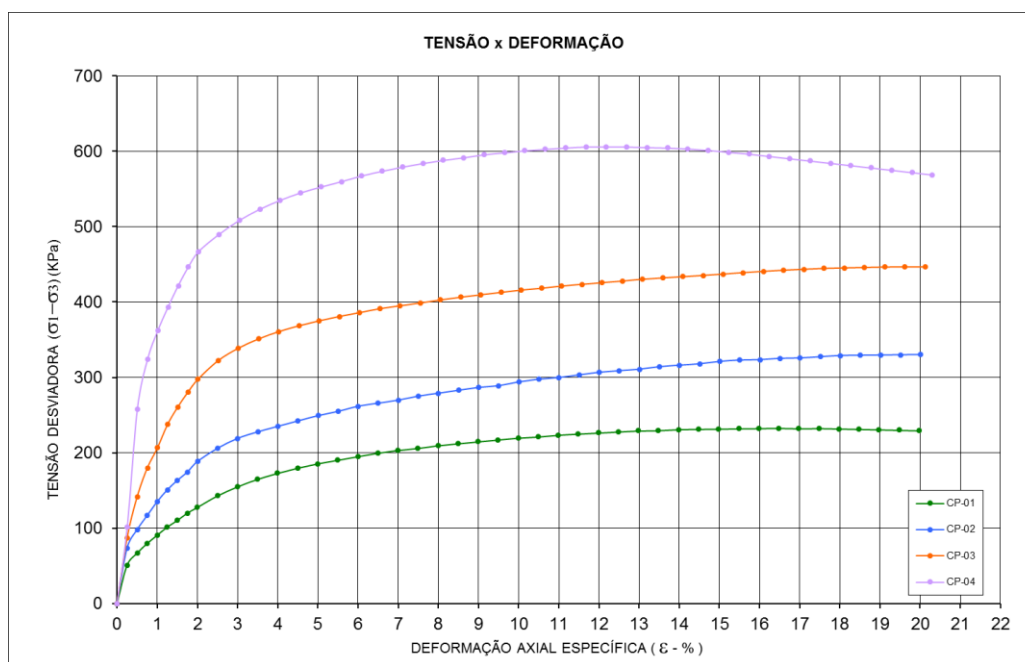
Fonte: Autora



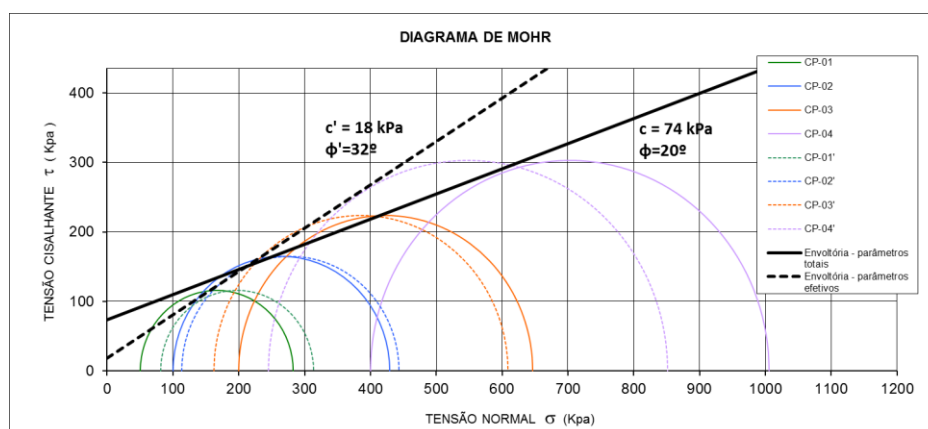
**Tabela 72 - Amostra 2 – Filito - hótima+4% - Ensaio CU saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Unidade média (%)	22,02	21,90	22,06	22,08
Grau de saturação (%)	80	80	81	80
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	15,86	15,87	15,86	15,83
Índice de Vazios	0,77	0,77	0,77	0,77
$\Delta h$ (%)	3,92	3,80	3,96	3,98
GC	95,1%	95,2%	95,1%	94,9%

Fonte: Autora.

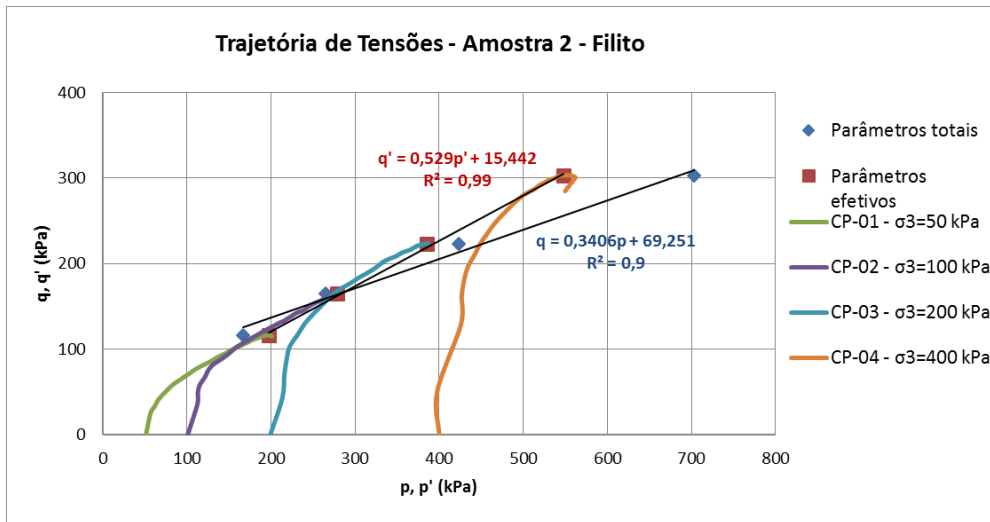
**Figura 218 – Amostra 2 – Filito - hótima +4% - Ensaio CU saturado.**

Fonte: Autora.

**Figura 219 – Amostra 2 - Filito - hótima +4% - Ensaio CU saturado.**

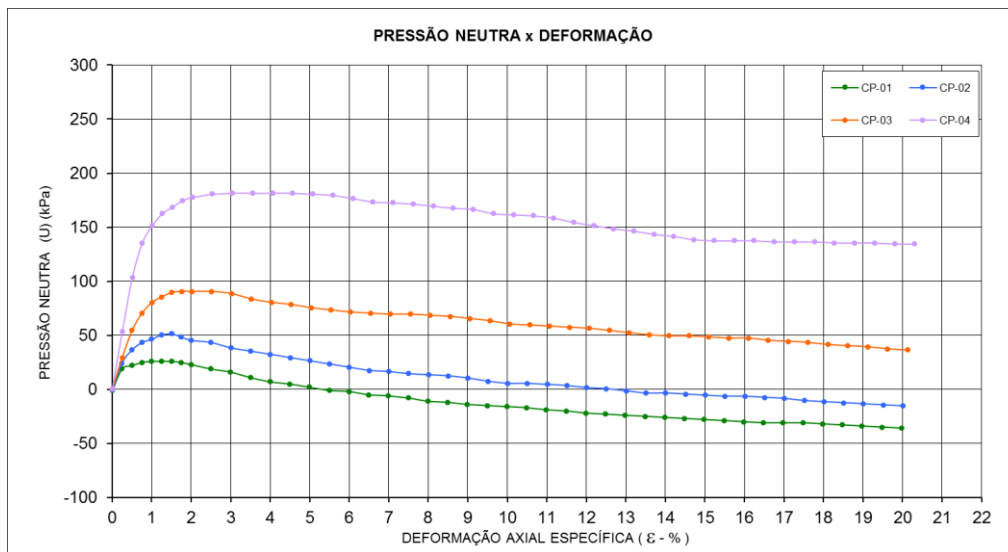
Fonte: Autora.

**Figura 220 – Amostra 2 - Filito - hótima +4% - Ensaio CU saturado.**



Fonte: Autora.

**Figura 221 – Amostra 2 - Filito - hótima +4% - Ensaio CU saturado.**



Fonte: Autora.

**Tabela 73 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  - Ensaio CU saturado.**

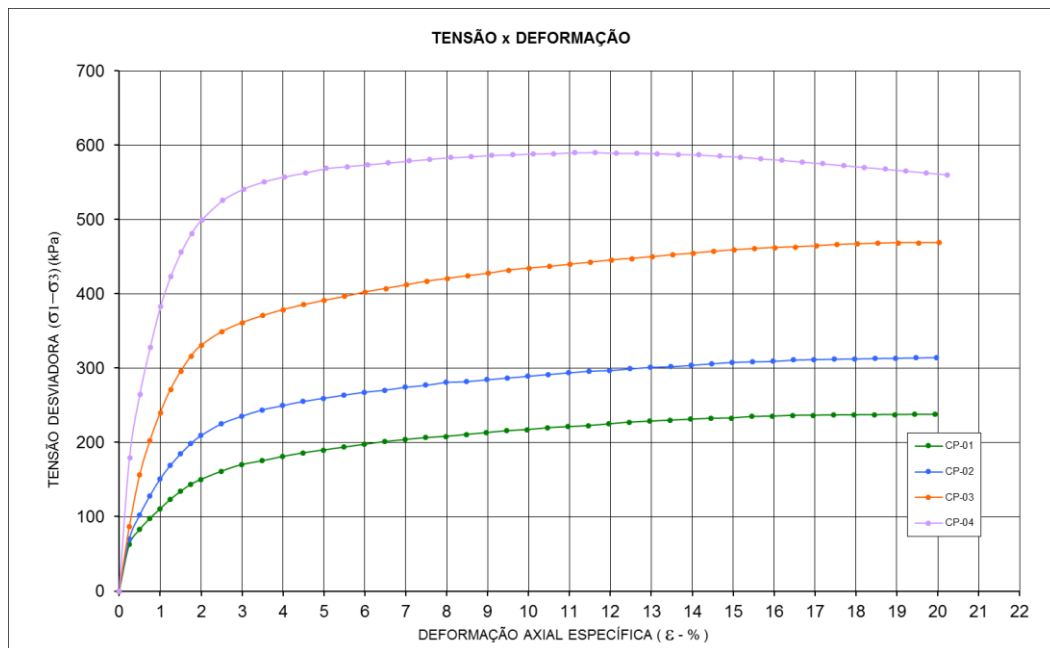
Amostra 2 - Litologia: Filito - hótima+4%				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1-\sigma_3$ (kPa)	$1/2*(\sigma_1-\sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	232,73	116,36	1,60	7.273
100	329,66	164,83	1,70	9.696
200	446,65	223,33	1,10	20.302
400	605,88	302,94	0,75	40.392

Fonte: Autora

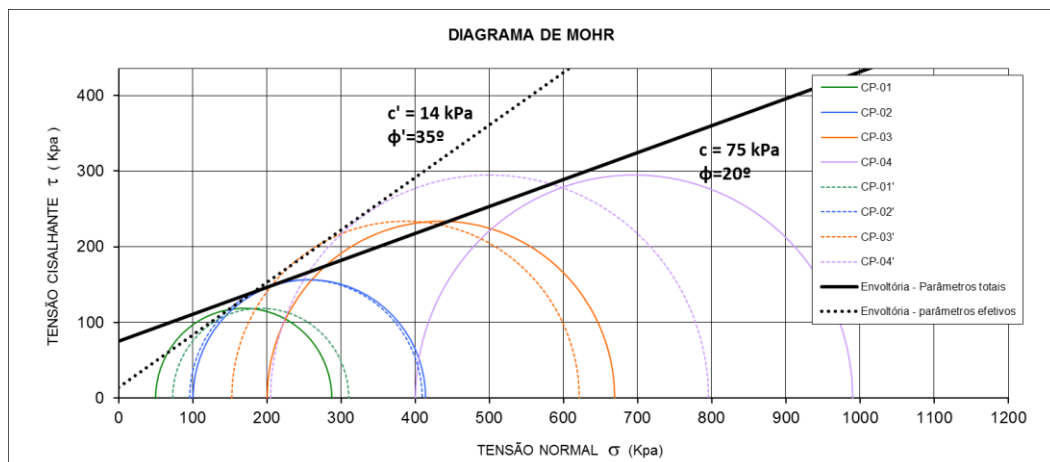
**Tabela 74 - Amostra 3 – Filito - hótima- Ensaio CU saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	18,58	18,58	18,64	18,66
Grau de saturação (%)	69	69	69	69
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	15,87	15,88	15,87	15,87
Índice de Vazios	0,75	0,75	0,75	0,75
$\Delta h$ (%)	-0,22	-0,22	-0,16	-0,14
GC	95,2%	95,3%	95,2%	95,2%

Fonte: Autora.

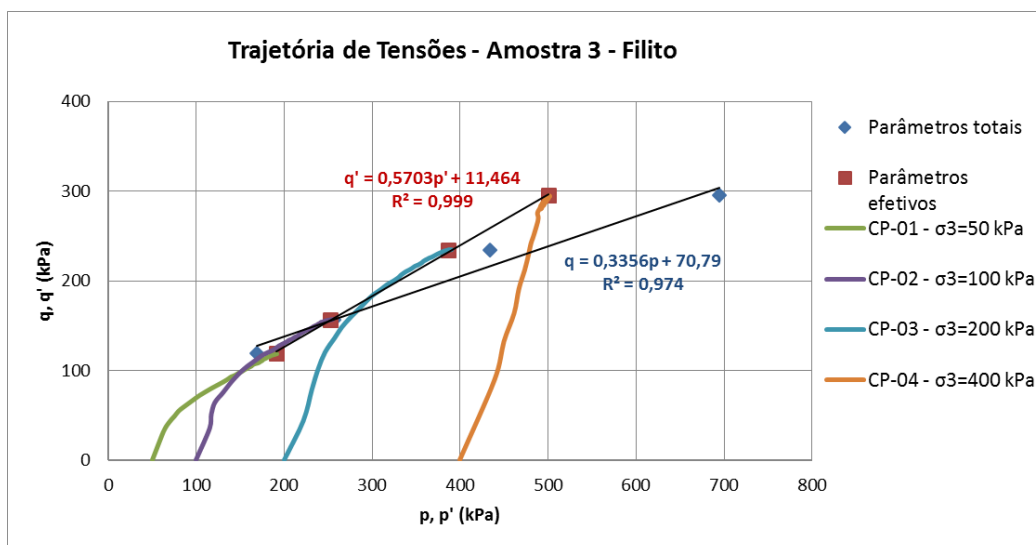
**Figura 222 – Amostra 3 – Filito - hótima - Ensaio CU saturado.**

Fonte: Autora.

**Figura 223 – Amostra 3 - Filito - hótima - Ensaio CU saturado.**

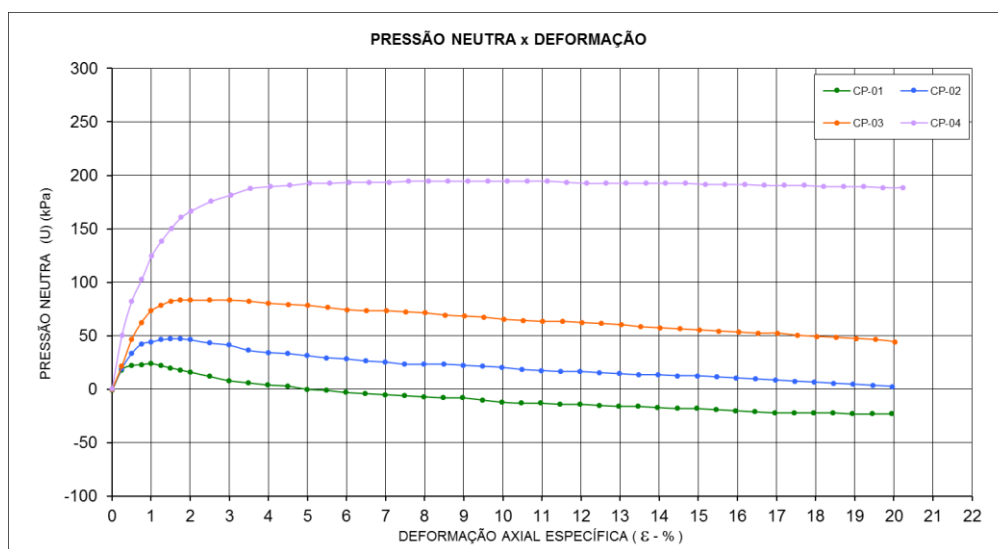
Fonte: Autora.

**Figura 224 – Amostra 3 - Filito - hótima - Ensaio CU saturado.**



**Fonte:** Autora.

**Figura 225 – Amostra 3 - Filito - hótima - Ensaio CU saturado.**



**Fonte:** Autora.

**Tabela 75 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  - Ensaio CU saturado.**

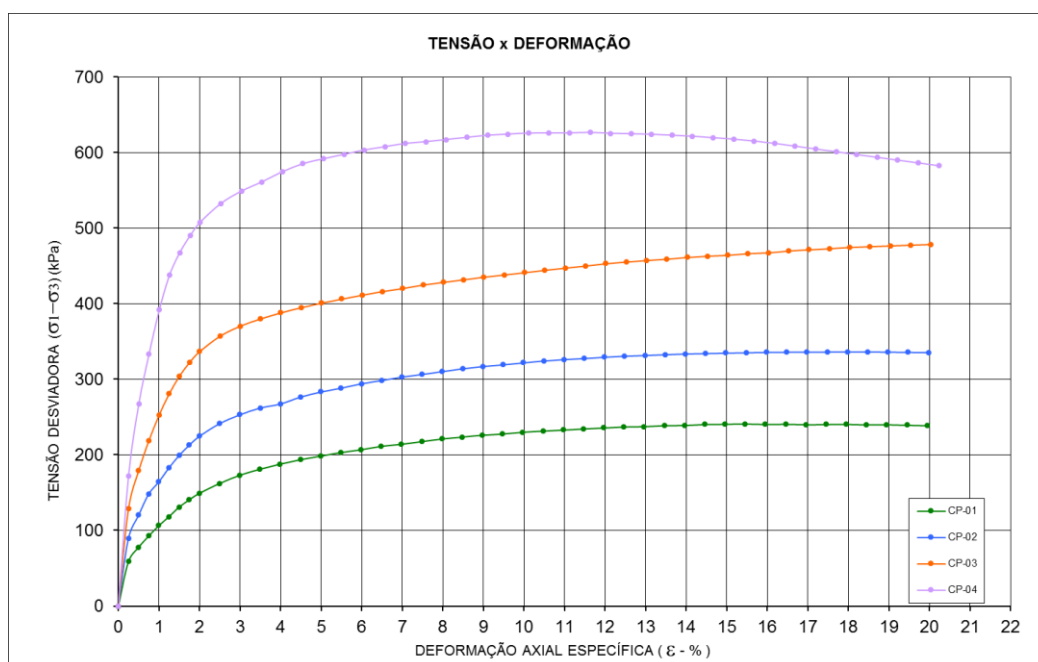
Amostra 3 - Litologia: Filito - hótima				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	237,53	118,76	1,20	9.897
100	313,55	156,77	1,05	14.931
200	468,64	234,32	1,00	23.432
400	590,22	295,11	0,60	49.185

**Fonte:** Autora

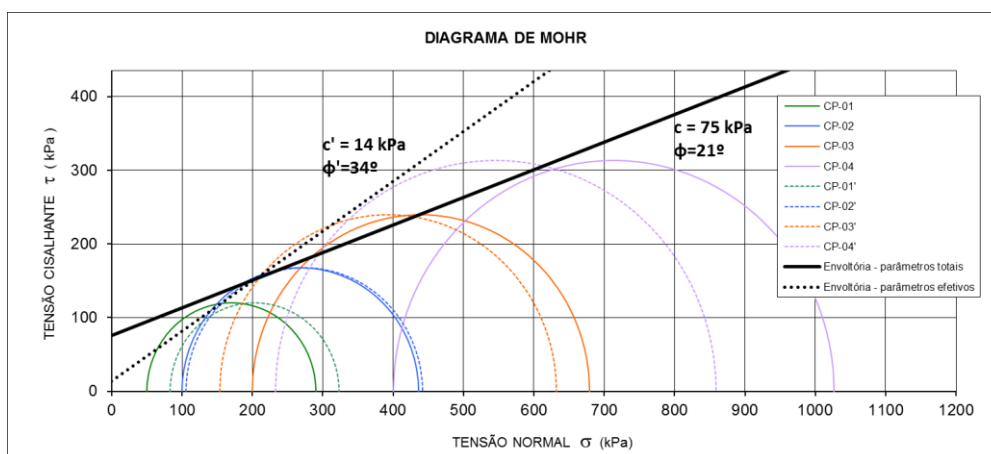
**Tabela 76 - Amostra 3 – Filito - h<sub>ótima</sub>+2% - Ensaio CU saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	20,64	20,61	20,65	20,57
Grau de saturação (%)	76	76	76	76
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	15,86	15,87	15,85	15,87
Índice de Vazios	0,75	0,75	0,76	0,75
$\Delta h$ (%)	1,84	1,81	1,85	1,77
GC	95,2%	95,2%	95,1%	95,2%

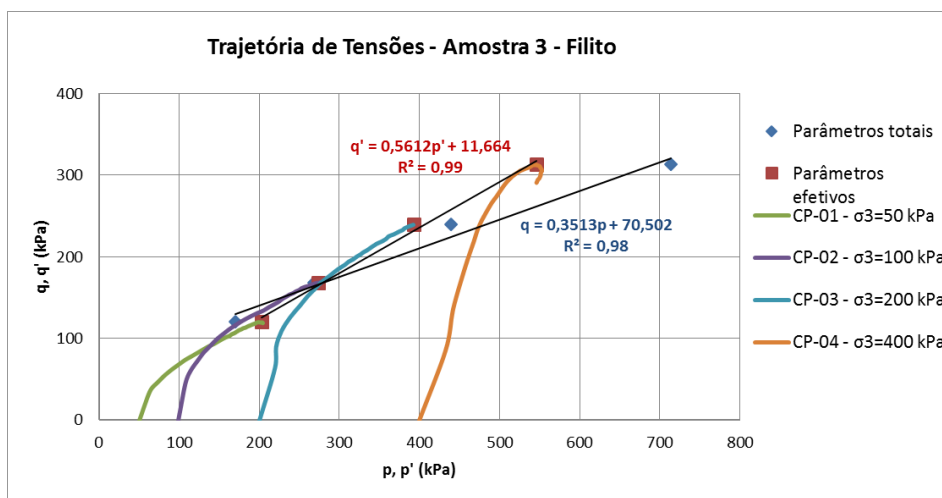
Fonte: Autora.

**Figura 226 – Amostra 3 – Filito - h<sub>ótima</sub> + 2% - Ensaio CU saturado.**

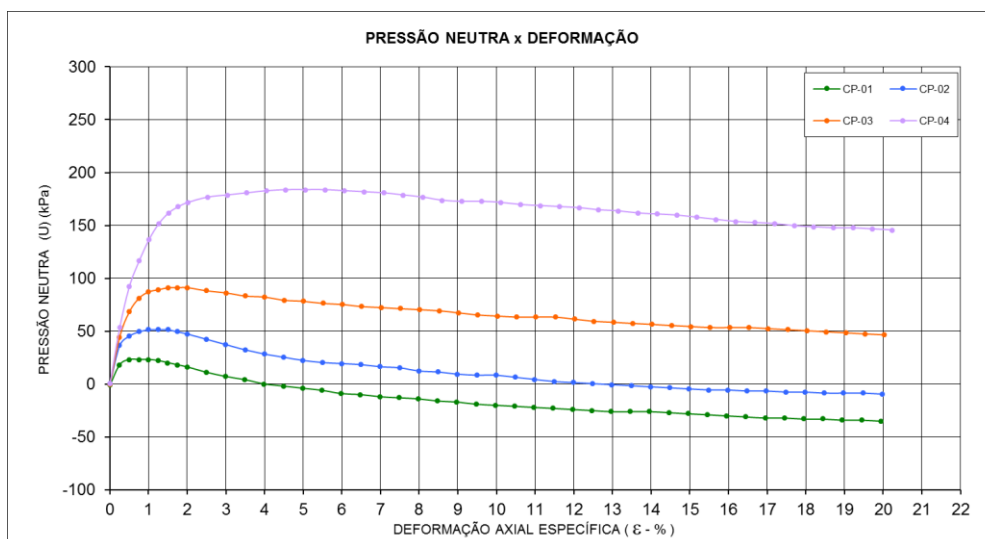
Fonte: Autora.

**Figura 227 – Amostra 3 - Filito - h<sub>ótima</sub> + 2% - Ensaio CU saturado.**

Fonte: Autora.

**Figura 228** – Amostra 3 - Filito - hótima + 2% - Ensaio CU saturado.

Fonte: Autora.

**Figura 229** – Amostra 3 - Filito - hótima + 2% - Ensaio CU saturado.

Fonte: Autora.

**Tabela 77** – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  - Ensaio CU saturado.

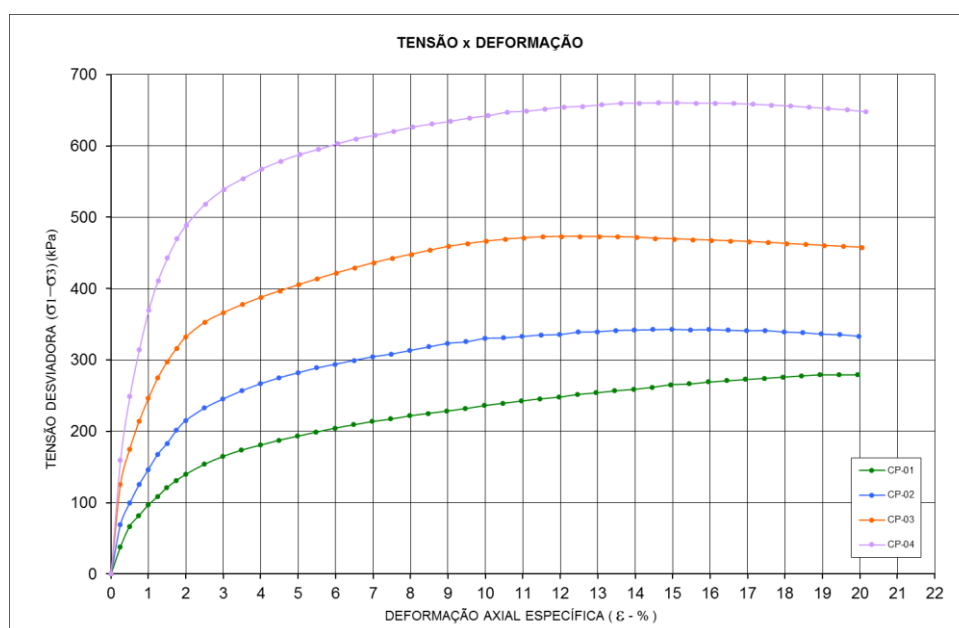
Amostra 3 - Litologia: Filito - hótima+2%				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	240,57	120,29	1,25	9.623
100	335,94	167,97	1,00	16.797
200	478,70	239,35	0,90	26.594
400	626,66	313,33	0,60	52.221

Fonte: Autora

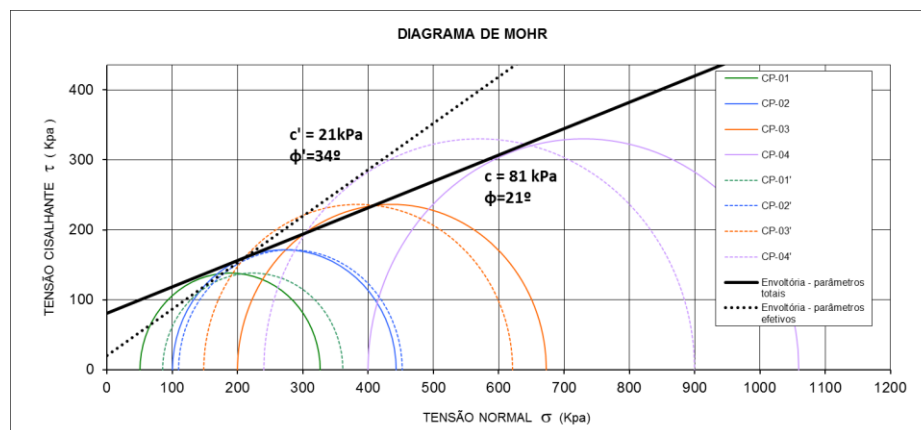
**Tabela 78 - Amostra 3 – Filito - hótima+4% - Ensaio CU saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	22,64	22,72	22,61	22,59
Grau de saturação (%)	84	84	83	83
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	15,87	15,86	15,86	15,87
Índice de Vazios	0,75	0,75	0,75	0,75
$\Delta h$ (%)	3,84	3,92	3,81	3,79
GC	95,2%	95,1%	95,2%	95,2%

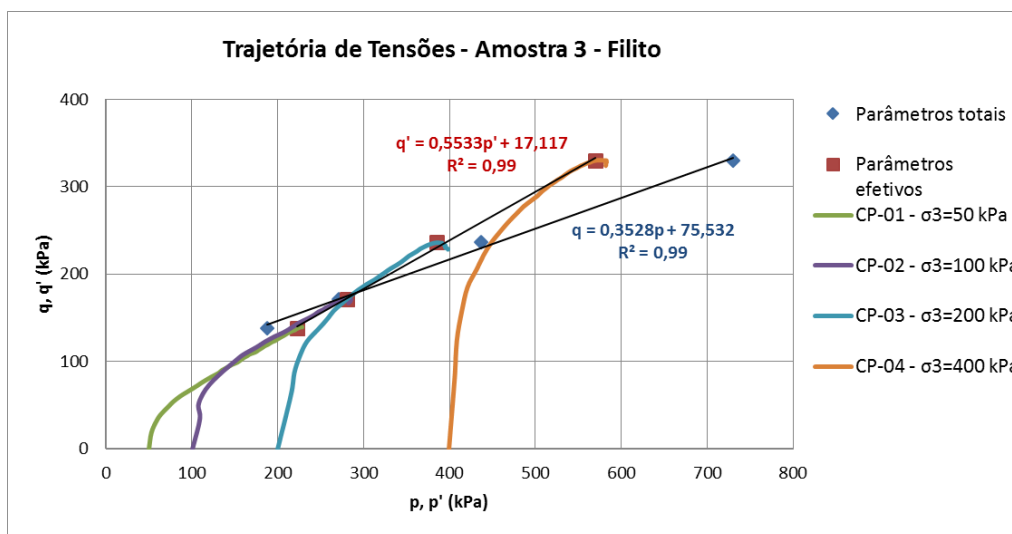
Fonte: Autora.

**Figura 230 – Amostra 3 – Filito - hótima + 4% - Ensaio CU saturado.**

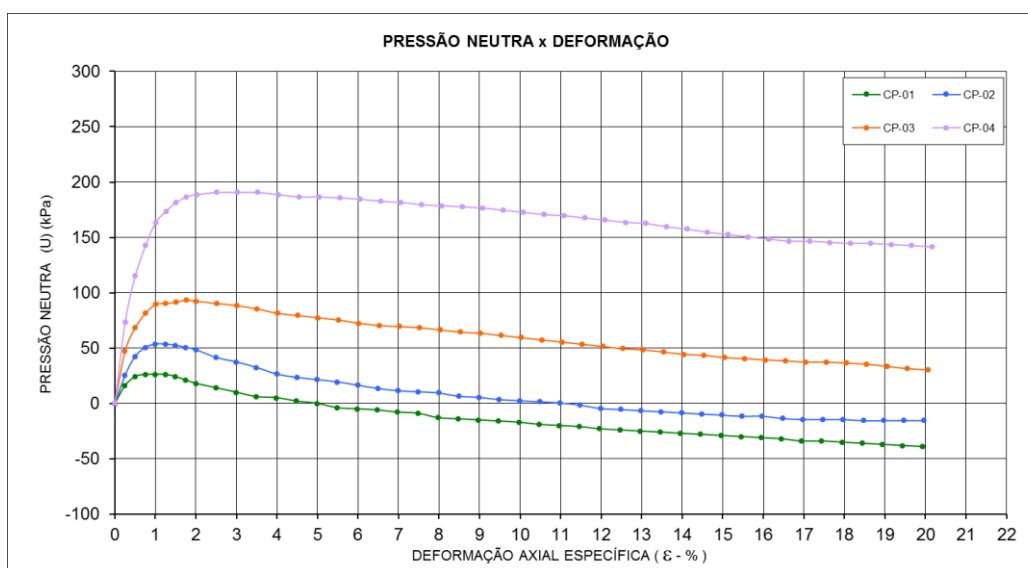
Fonte: Autora.

**Figura 231 – Amostra 3 - Filito - hótima + 4% - Ensaio CU saturado.**

Fonte: Autora.

**Figura 232** – Amostra 3 - Filito - hótima + 4% - Ensaio CU saturado.

Fonte: Autora.

**Figura 233** – Amostra 3 - Filito - hótima + 4% - Ensaio CU saturado.

Fonte: Autora.

**Tabela 79** – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  - Ensaio CU saturado.

Amostra 3 - Litologia: Filito - hótima+4%				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	276,20	138,10	2,00	6.905
100	342,51	171,25	1,30	13.173
200	472,99	236,50	1,00	23.650
400	659,62	329,81	0,90	36.646

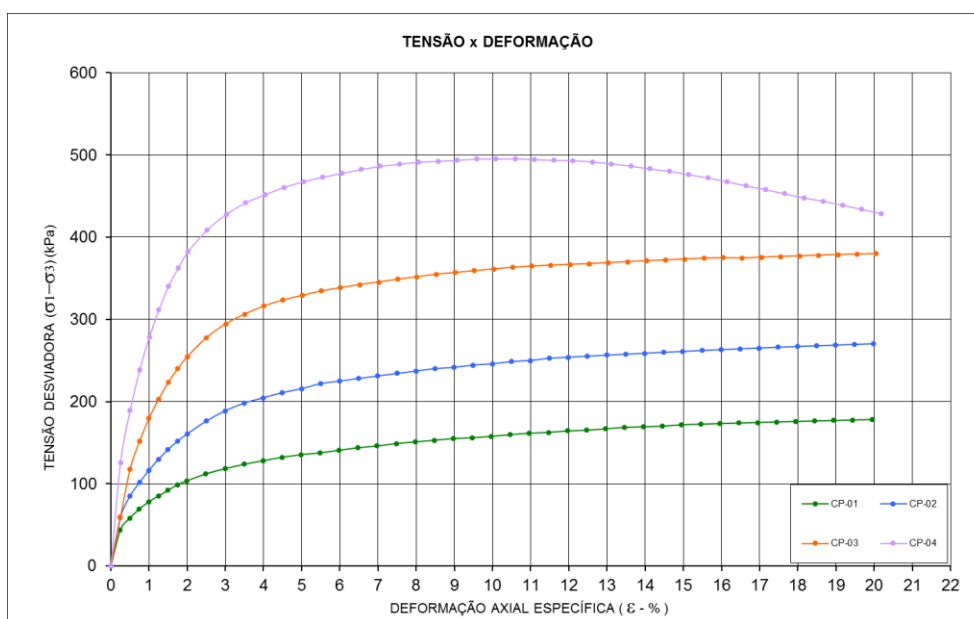
Fonte: Autora



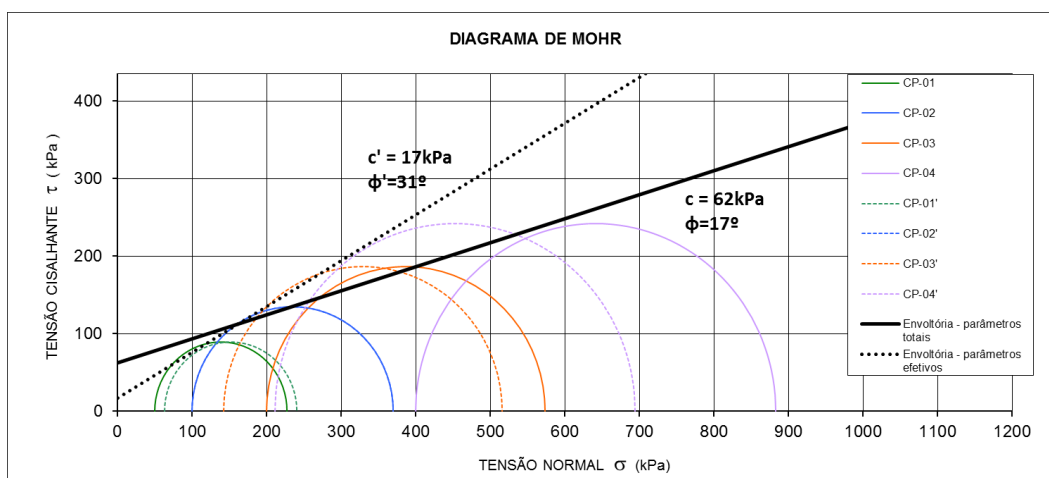
**Tabela 80** - Amostra 6 – Ultramilonito –  $h_{ótima}$  - Ensaio CU saturado.

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	22,90	22,93	22,92	23,12
Grau de saturação (%)	72	72	73	73
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	14,85	14,84	14,86	14,83
Índice de Vazios	0,88	0,89	0,88	0,89
$\Delta h$ (%)	-0,30	-0,27	-0,28	-0,08
GC	95,2%	95,2%	95,2%	95,1%

Fonte: Autora.

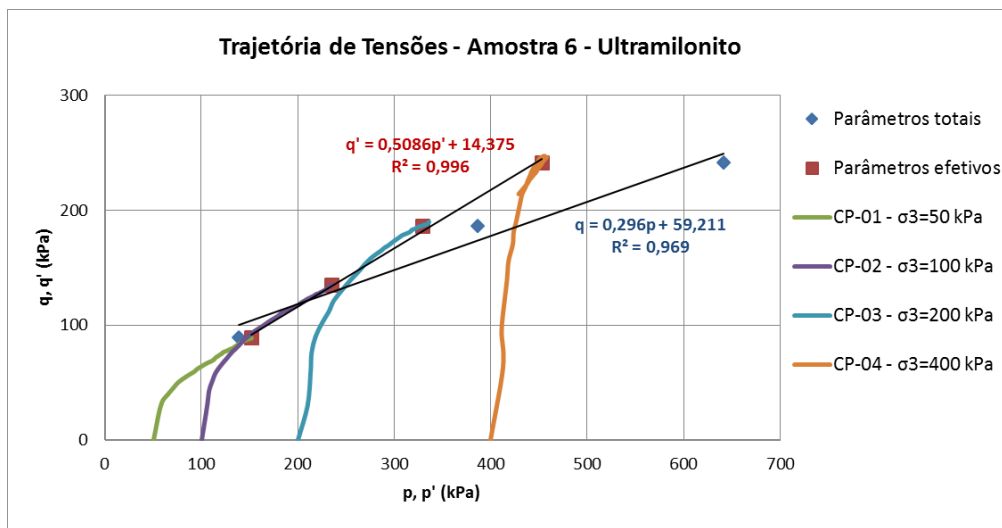
**Figura 234** – Amostra 6 – Ultramilonito -  $h_{ótima}$  - Ensaio CU saturado.

Fonte: Autora.

**Figura 235** – Amostra 6 – Ultramilonito –  $h_{ótima}$  - Ensaio CU saturado.

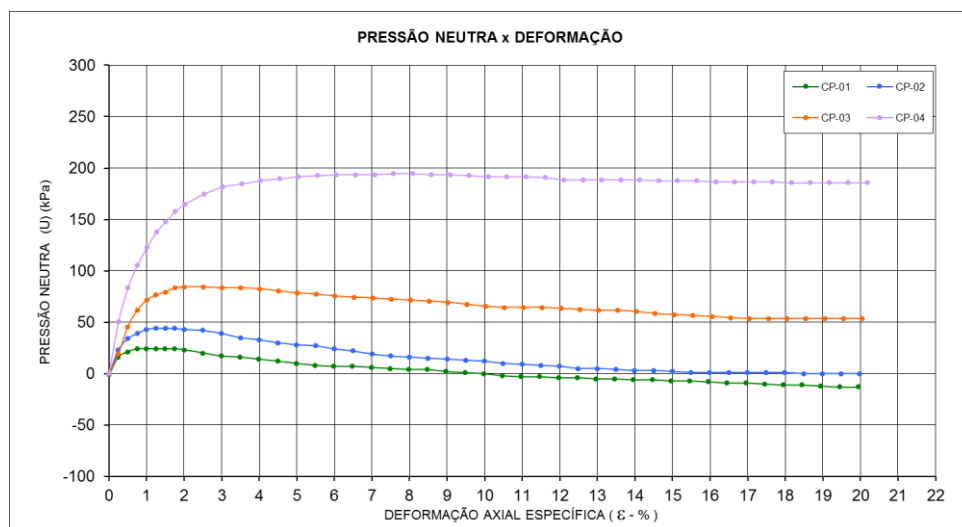
Fonte: Autora.

**Figura 236 – Amostra 6 – Ultramilonito – h<sub>ótima</sub> - Ensaio CU saturado.**



Fonte: Autora.

**Figura 237 – Amostra 6 – Ultramilonito – h<sub>ótima</sub>. - Ensaio CU saturado.**



Fonte: Autora.

**Tabela 81 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  - Ensaio CU saturado.**

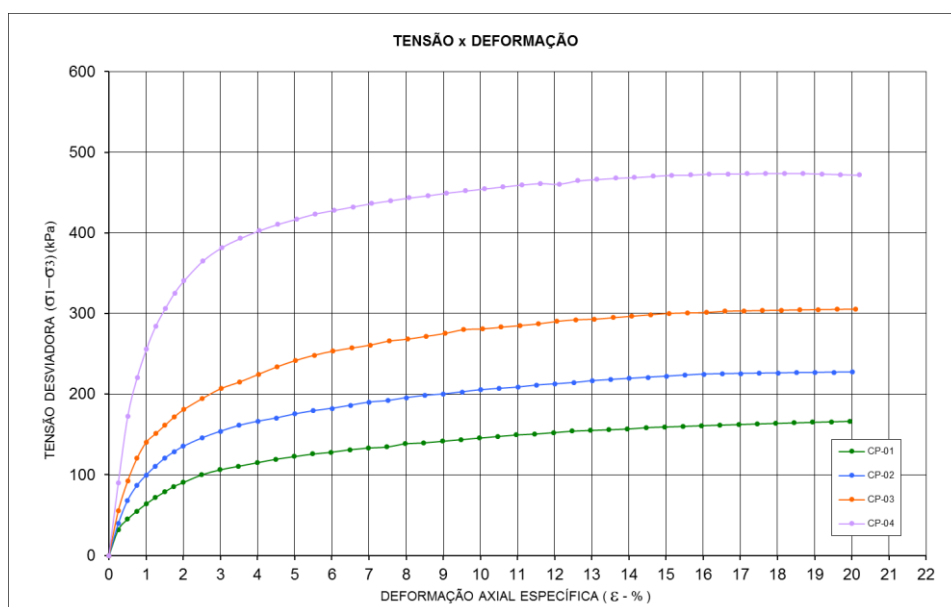
Amostra 6 - Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub>				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	177,58	88,79	1,30	6.830
100	269,58	134,79	1,30	10.368
200	373,33	186,67	1,10	16.970
400	483,11	241,56	0,80	30.194

Fonte: Autora

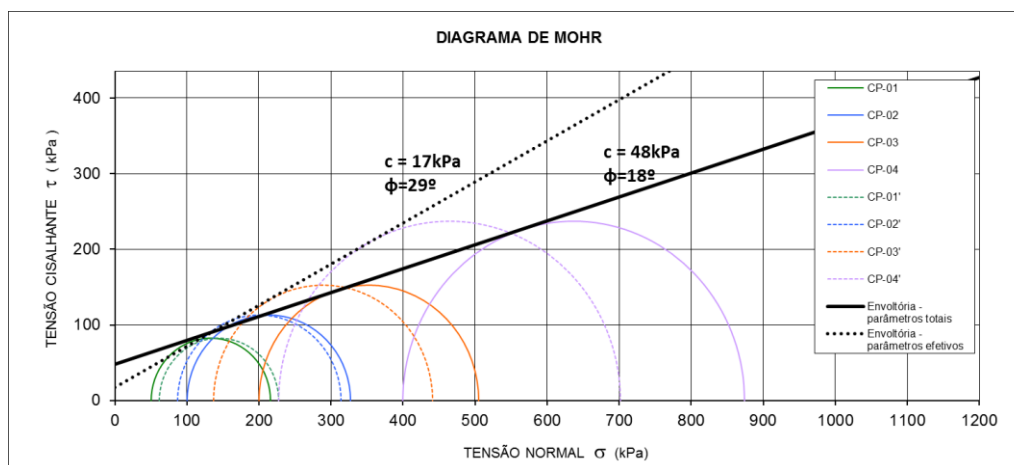
**Tabela 82 - Amostra 6 – Ultramilonito – h<sub>ótima</sub> + 2% - Ensaio CU saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	24,91	24,86	24,92	25,03
Grau de saturação (%)	79	79	79	79
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	14,85	14,85	14,85	14,84
Índice de Vazios	0,89	0,88	0,88	0,89
$\Delta h$ (%)	1,71	1,66	1,72	1,83
GC	95,2%	95,2%	95,2%	95,2%

Fonte: Autora.

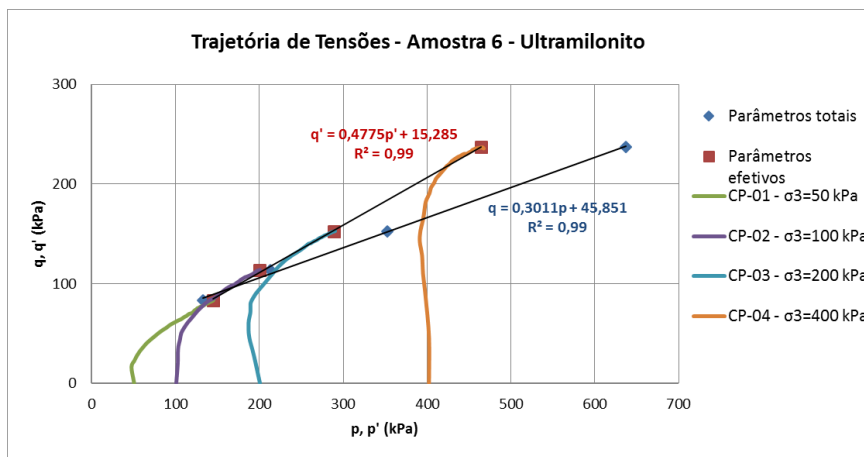
**Figura 238 – Amostra 6 – Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> + 2% - Ensaio CU saturado.**

Fonte: Autora.

**Figura 239 – Amostra 6 – Ultramilonito – h<sub>ótima</sub> + 2% - Ensaio CU saturado.**

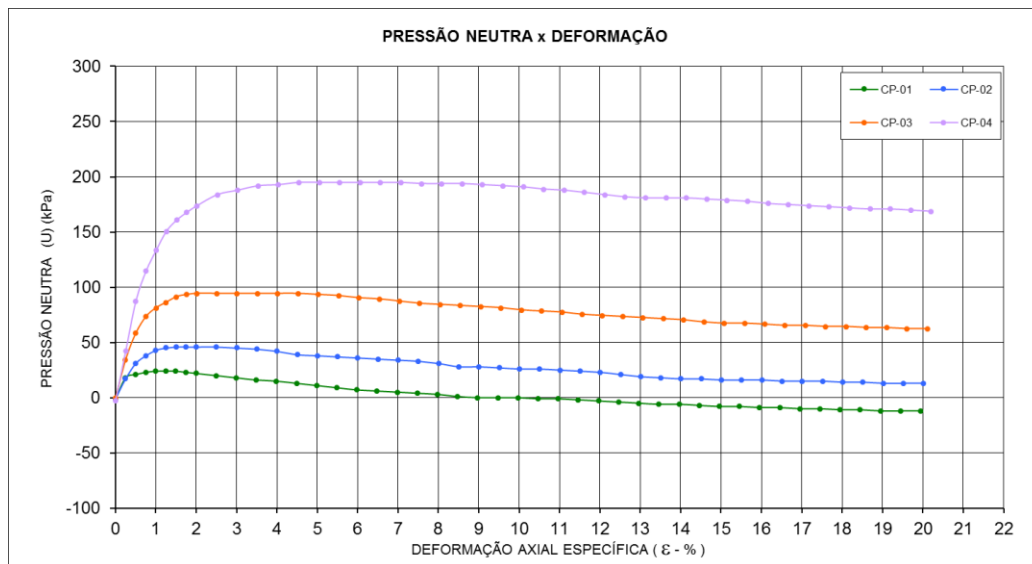
Fonte: Autora.

**Figura 240 – Amostra 6 – Ultramilonito – h<sub>ótima</sub> + 2% - Ensaio CU saturado.**



Fonte: Autora.

**Figura 241 – Amostra 6 – Ultramilonito – h<sub>ótima</sub> + 2% - Ensaio CU saturado.**



Fonte: Autora.

**Tabela 83 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante E<sub>50</sub> - Ensaio CU saturado.**

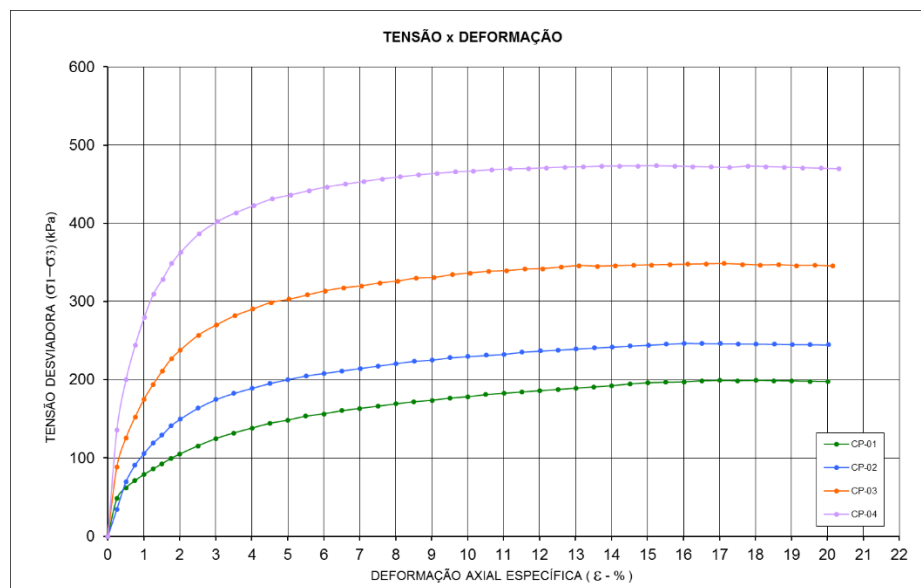
Amostra 6 - Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> +2%				
σ <sub>3</sub> (kPa)	σ <sub>1</sub> -σ <sub>3</sub> (kPa)	1/2*(σ <sub>1</sub> -σ <sub>3</sub> ) (kPa)	ε (%)	E <sub>50</sub> (kPa)
50	165,82	82,91	1,60	5.182
100	226,79	113,39	1,30	8.723
200	304,60	152,30	1,10	13.846
400	473,96	236,98	0,90	26.331

Fonte: Autora

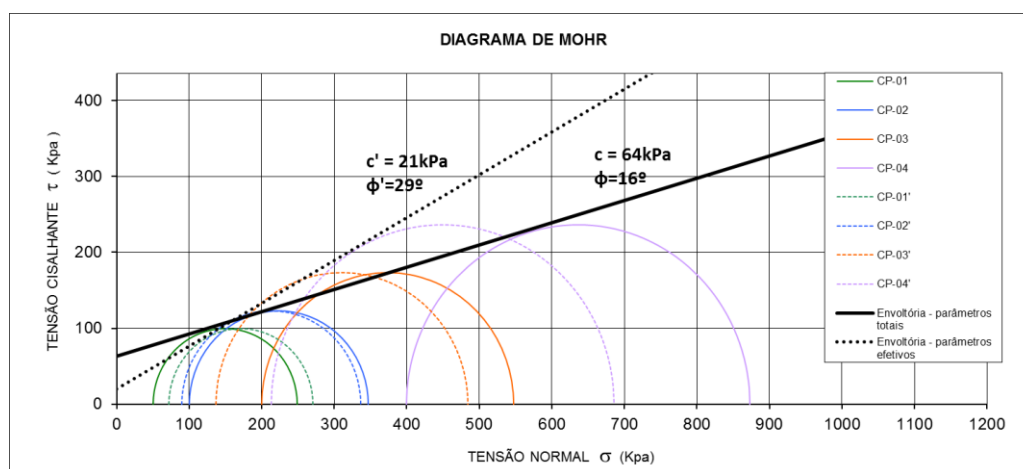
**Tabela 84 - Amostra 6 – Ultramilonito – h<sub>ótima</sub> + 4% - Ensaio CU saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	27,00	26,99	26,97	27,10
Grau de saturação (%)	85	85	85	85
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	14,84	14,84	14,84	14,83
Índice de Vazios	0,89	0,89	0,89	0,89
$\Delta h$ (%)	3,80	3,79	3,77	3,90
GC	95,2%	95,1%	95,1%	95,1%

Fonte: Autora.

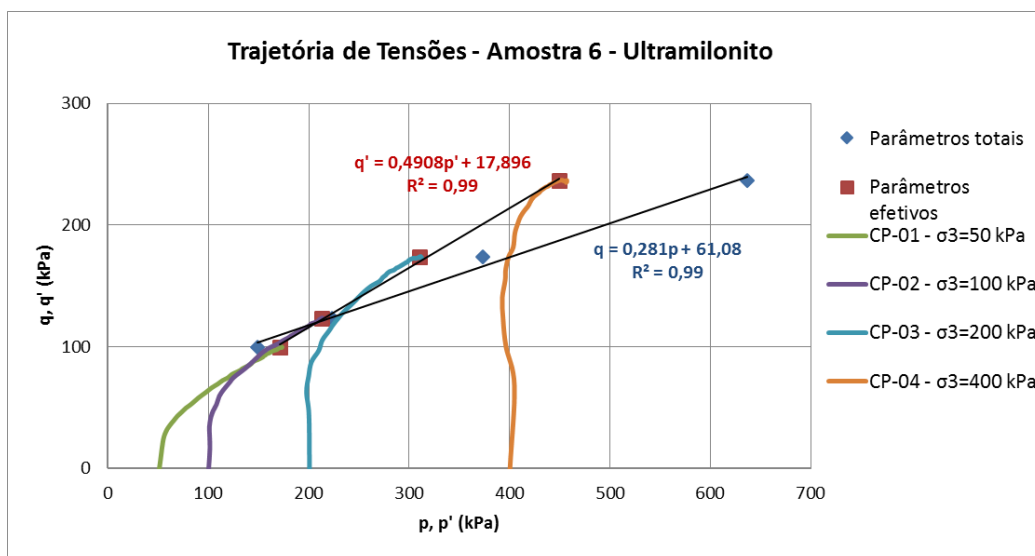
**Figura 242 – Amostra 6 – Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> + 4% - Ensaio CU saturado.**

Fonte: Autora.

**Figura 243 – Amostra 6 – Ultramilonito – h<sub>ótima</sub> + 4% - Ensaio CU saturado.**

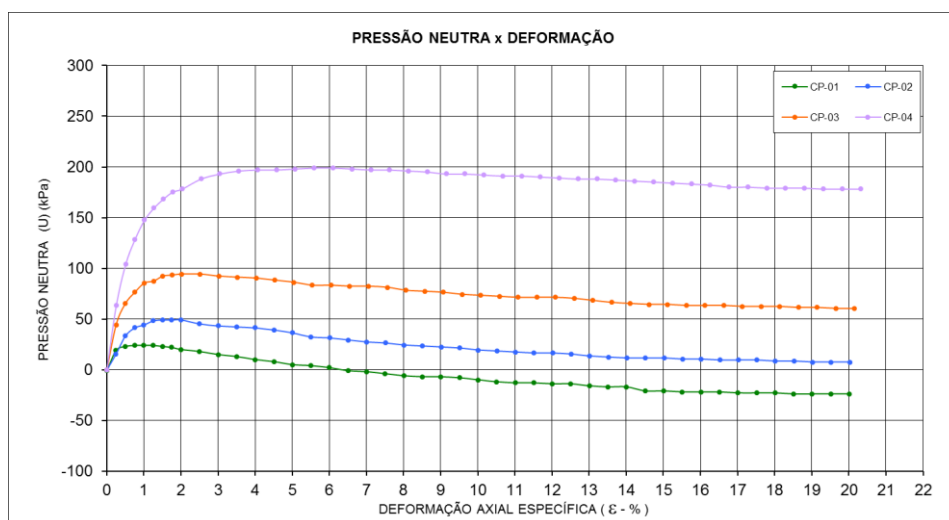
Fonte: Autora.

**Figura 244 – Amostra 6 – Ultramilonito – h<sub>ótima</sub> + 4% - Ensaio CU saturado.**



Fonte: Autora.

**Figura 245 – Amostra 6 – Ultramilonito – h<sub>ótima</sub> + 4% - Ensaio CU saturado.**



Fonte: Autora.

**Tabela 85 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante E<sub>50</sub> - Ensaio CU saturado.**

Amostra 6 - Litologia: Ultramilonito - h <sub>ótima</sub> +4%				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1-\sigma_3$ (kPa)	$1/2*(\sigma_1-\sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	E <sub>50</sub> (kPa)
50	198,59	99,30	1,75	5.674
100	246,68	123,34	1,30	9.488
200	347,62	173,81	1,00	17.381
400	472,86	236,43	0,75	31.524

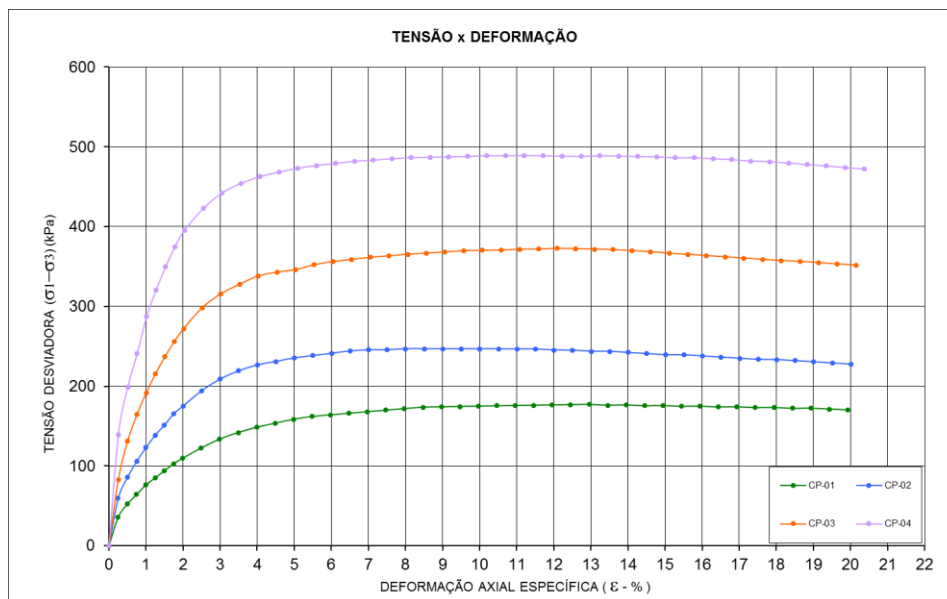
Fonte: Autora

**Tabela 86 - Amostra 7 – Granito pouco milonitizado – hótima - Ensaio CU saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	28,52	28,58	28,56	28,65
Grau de saturação (%)	71	71	71	71
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	13,07	13,06	13,07	13,04
Índice de Vazios	1,10	1,10	1,10	1,10
$\Delta h$ (%)	-0,28	-0,22	-0,24	-0,15
GC	95,3%	95,2%	95,3%	95,1%

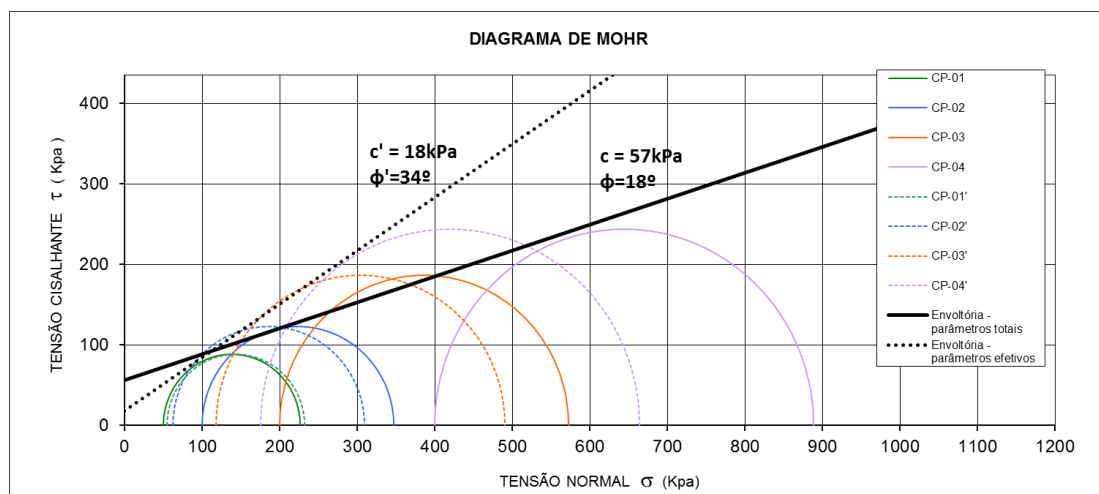
Fonte: Autora.

**Figura 246 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - hótima - Ensaio CU saturado.**



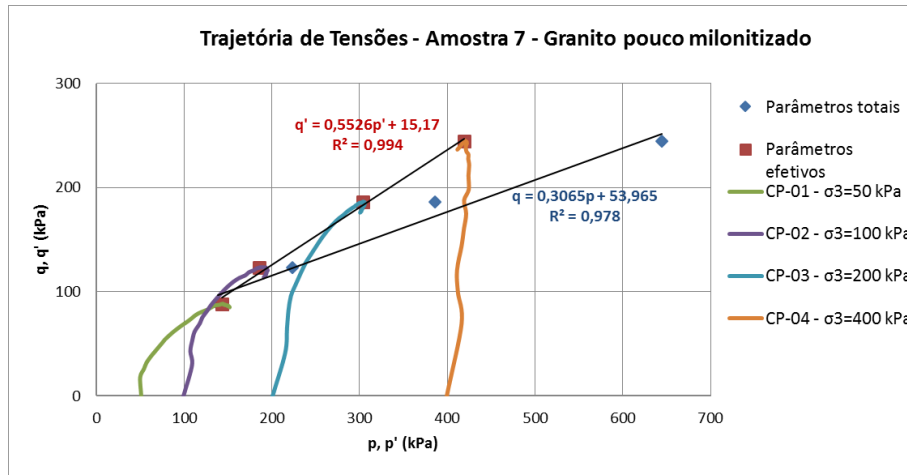
Fonte: Autora.

**Figura 247 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - hótima - Ensaio CU saturado.**



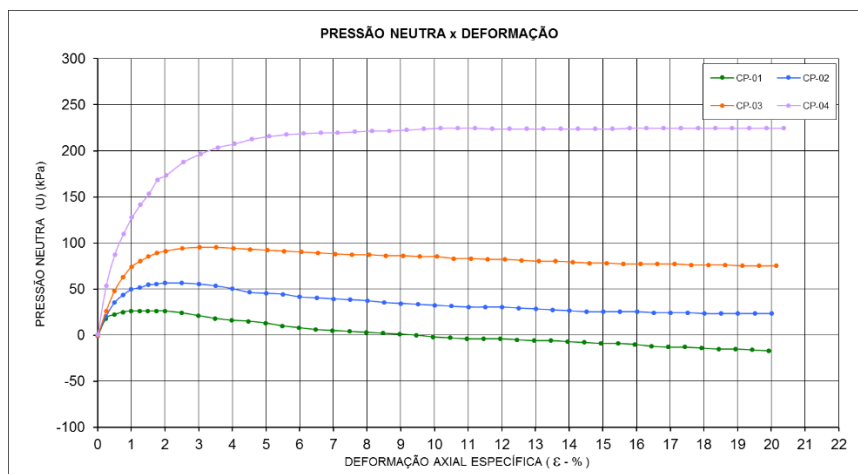
Fonte: Autora.

**Figura 248 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - hótima - Ensaio CU saturado.**



Fonte: Autora.

**Figura 249 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - hótima - Ensaio CU saturado.**



Fonte: Autora.

**Tabela 87 – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  - Ensaio CU saturado.**

Amostra 7 - Litologia: Granito pouco milonitizado - hótima				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	176,83	88,42	1,30	6.801
100	246,91	123,45	1,00	12.345
200	372,69	186,34	0,95	19.615
400	488,89	244,45	0,80	30.556

Fonte: Autora

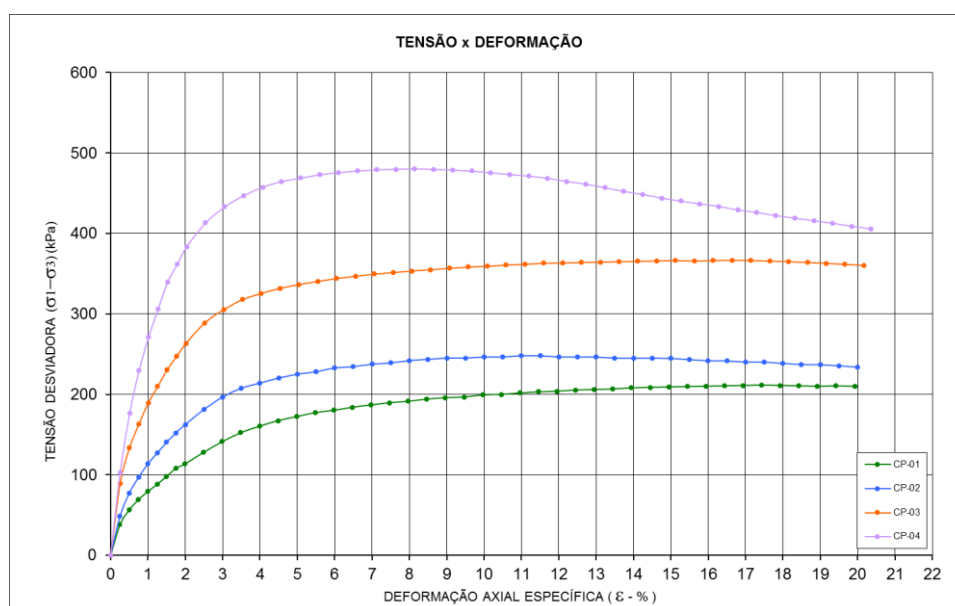


**Tabela 88 - Amostra 7 – Granito pouco milonitizado – h<sub>ó</sub>tima+2% - Ensaio CU saturado.**

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	30,38	30,40	30,39	30,53
Grau de saturação (%)	76	76	76	76
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	13,08	13,08	13,09	13,08
Índice de Vazios	1,10	1,09	1,09	1,10
$\Delta h$ (%)	1,58	1,60	1,59	1,73
GC	95,3%	95,3%	95,4%	95,3%

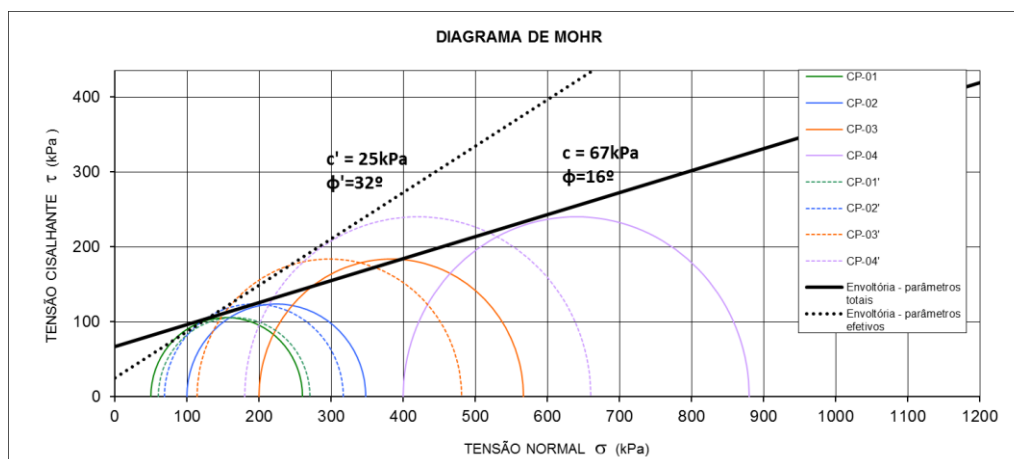
Fonte: Autora.

**Figura 250 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - h<sub>ó</sub>tima + 2% - Ensaio CU saturado.**



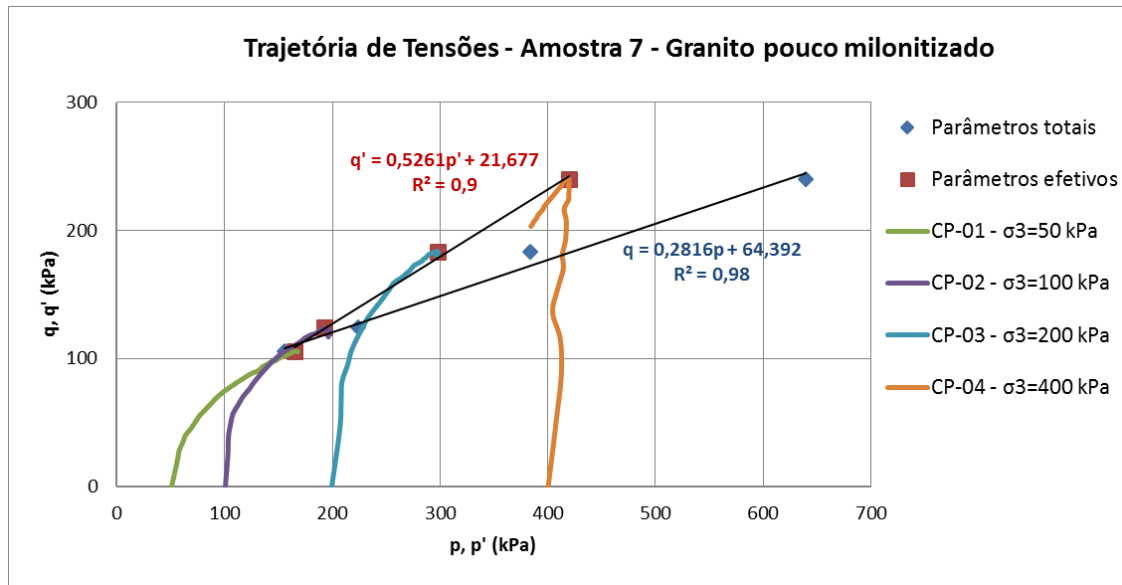
Fonte: Autora.

**Figura 251 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - h<sub>ó</sub>tima + 2% - Ensaio CU saturado.**



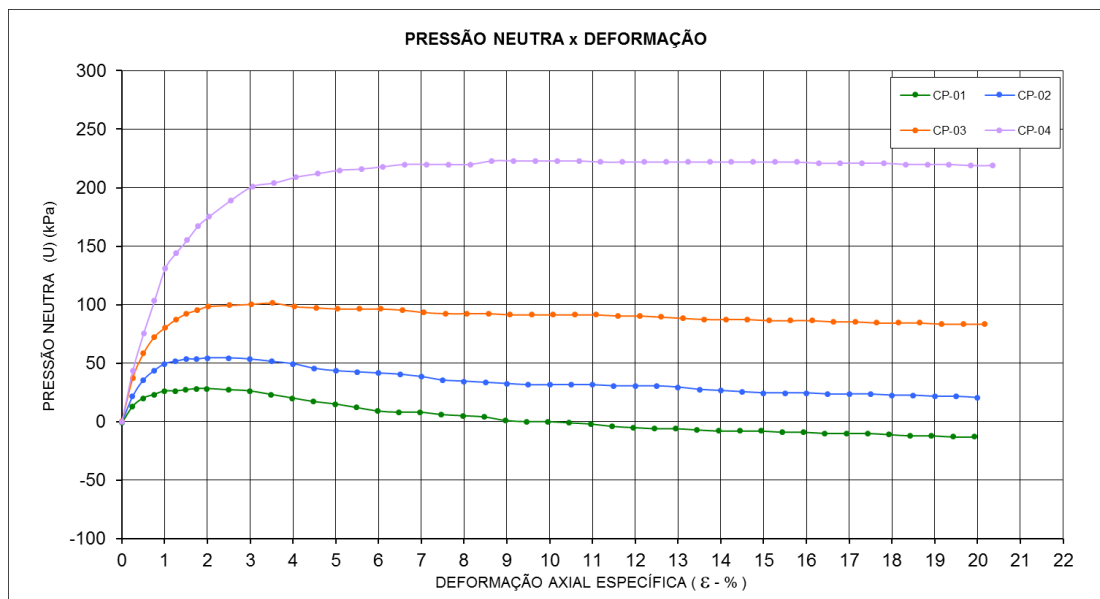
Fonte: Autora.

**Figura 252** – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima} + 2\%$  - Ensaio CU saturado.



Fonte: Autora.

**Figura 253** – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima} + 2\%$  - Ensaio CU saturado.



Fonte: Autora.

**Tabela 89** – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  - Ensaio CU saturado.

Amostra 7 - Litologia: Granito pouco milonitizado - $h_{ótima} + 2\%$				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$1/2 * (\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	210,60	105,30	1,70	6.194
100	247,89	123,94	1,20	10.329
200	366,70	183,35	1,00	18.335
400	479,77	239,89	0,85	28.222

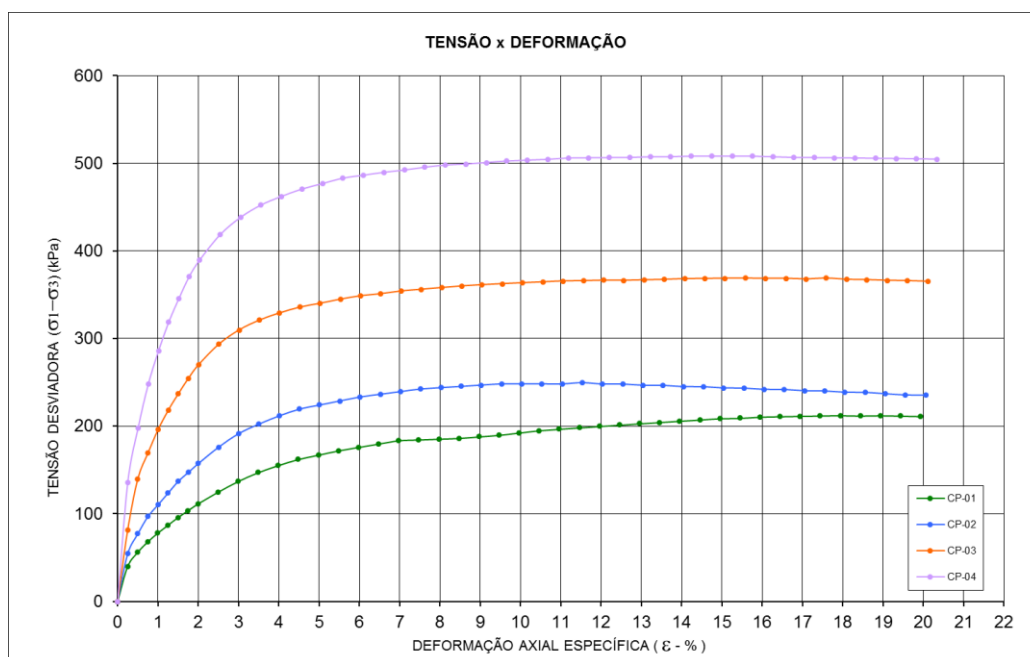
Fonte: Autora

**Tabela 90** - Amostra 7 – Granito pouco milonitizado –  $h_{ótima}+4\%$  - Ensaio CU saturado.

	CP-01	CP-02	CP-03	CP-04
$\sigma_3$ (kPa)	50	100	200	400
Umidade média (%)	32,52	32,57	32,51	32,35
Grau de saturação (%)	81	81	81	81
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	13,06	13,06	13,06	13,08
Índice de Vazios	1,10	1,10	1,10	1,10
$\Delta h$ (%)	3,72	3,77	3,71	3,55
GC	95,2%	95,2%	95,2%	95,4%

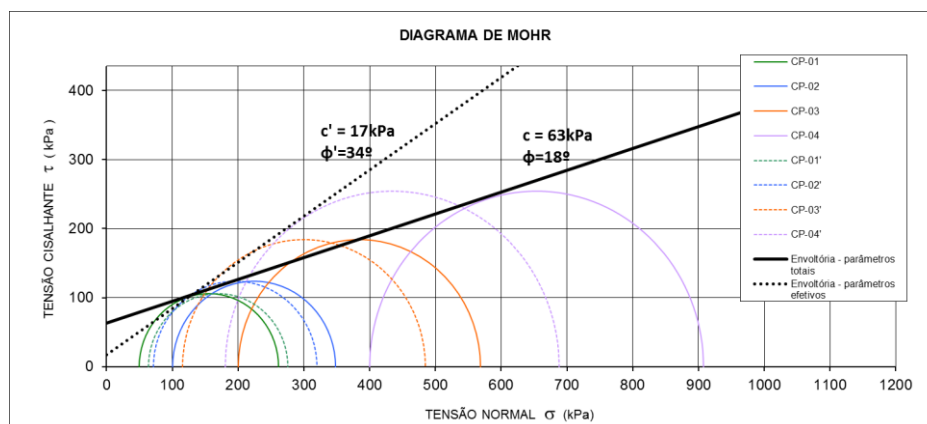
Fonte: Autora.

**Figura 254** – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima} + 4\%$  - Ensaio CU saturado.



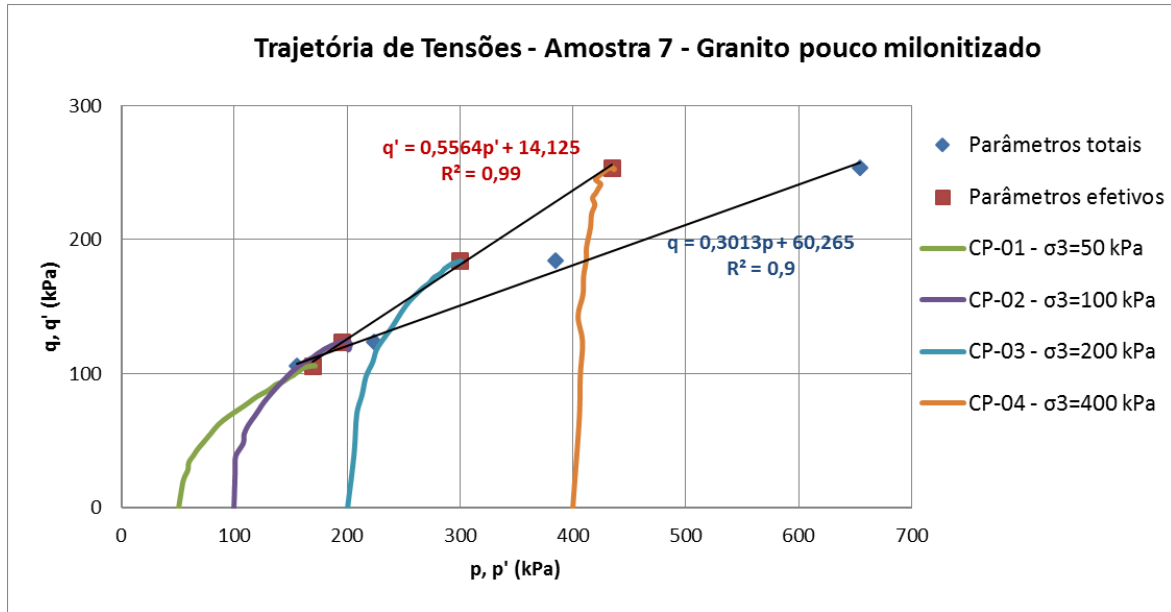
Fonte: Autora.

**Figura 255** – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima} + 4\%$  - Ensaio CU saturado.



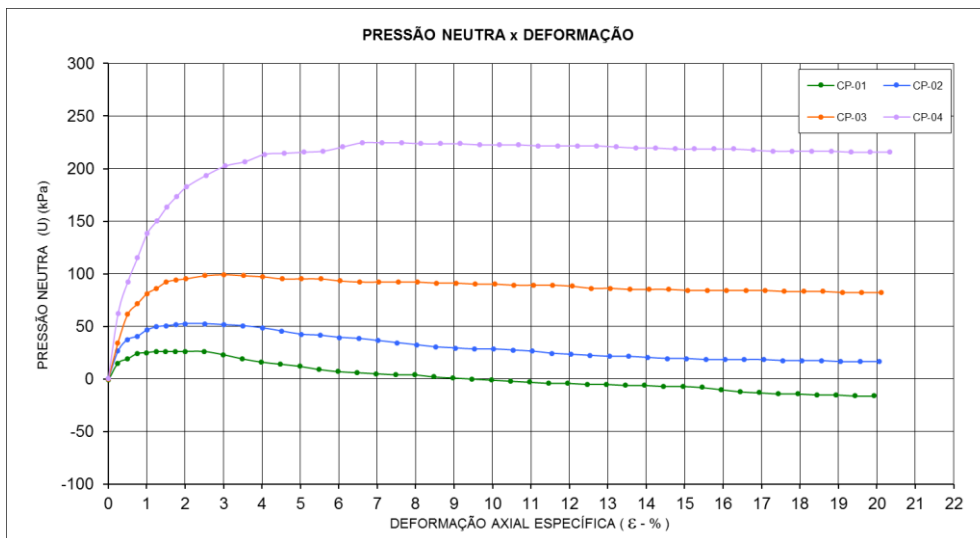
Fonte: Autora.

**Figura 256** – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima} + 4\%$  - Ensaio CU saturado.



Fonte: Autora.

**Figura 257** – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado -  $h_{ótima} + 4\%$  - Ensaio CU saturado.



Fonte: Autora.

**Tabela 91** – Cálculo do módulo de deformabilidade secante  $E_{50}$  - Ensaio CU saturado.

Amostra 7 - Litologia: Granito pouco milonitizado - $h_{ótima}+4\%$				
$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1-\sigma_3$ (kPa)	$1/2*(\sigma_1-\sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon$ (%)	$E_{50}$ (kPa)
50	211,84	105,92	1,90	5.575
100	248,26	124,13	1,25	9.930
200	368,71	184,36	0,90	20.484
400	508,04	254,02	0,80	31.753

Fonte: Autora

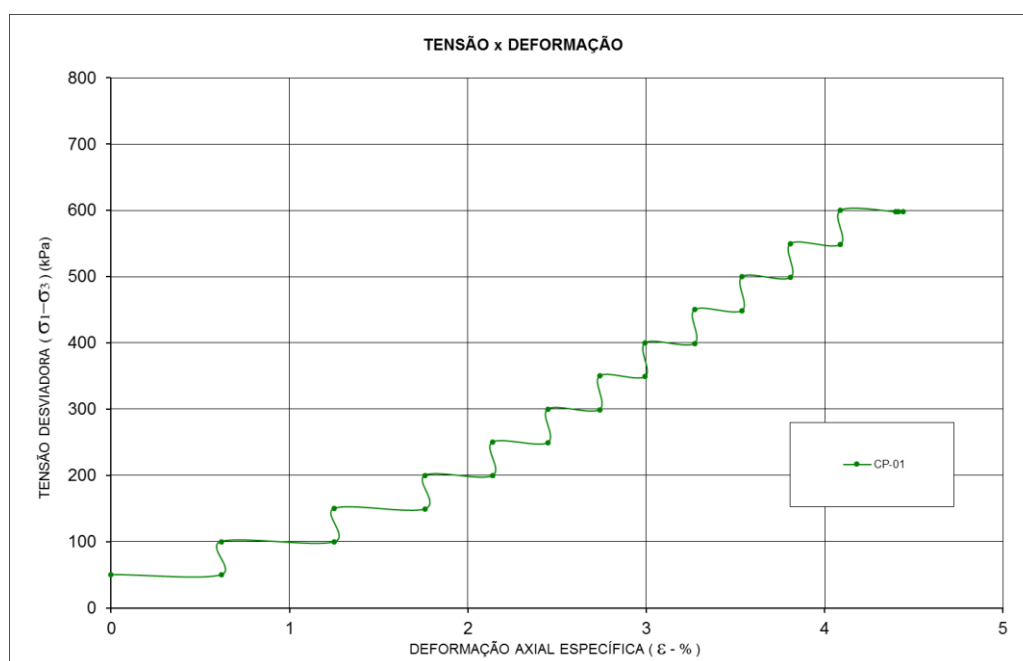
## APÊNDICE E – ENSAIOS TRIAXIAIS PN

Tabela 92 – Corpos de prova – Amostra 1 – Ensaio triaxial PN.

	CP - hótima	CP - hótima + 2%	CP - hótima + 4%
Umidade média (%)	16,29	18,30	20,29
Grau de saturação (%)	61	69	76
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	15,61	15,61	15,61
Índice de Vazios	0,71	0,71	0,71
$\Delta h$ (%)	-0,14	1,87	3,87
GC	95%	95%	95%

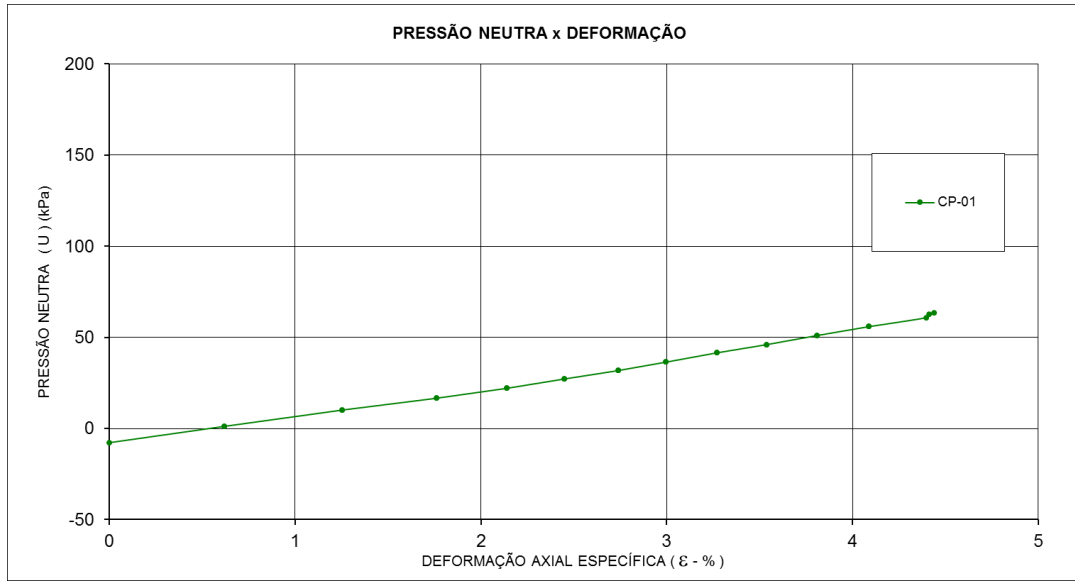
Fonte: Autora.

Figura 258 – Amostra 1 – Litologia: Filito/ Metabásica- hótima – Ensaio triaxial PN.



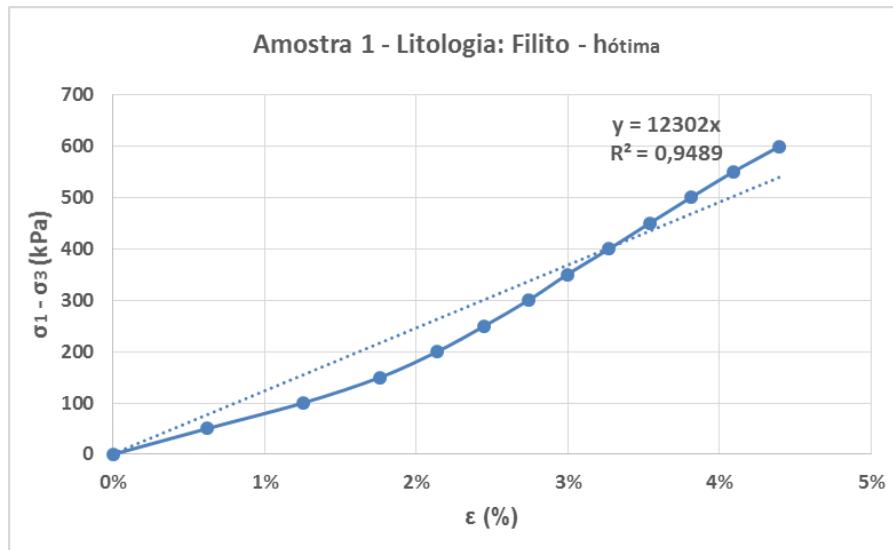
Fonte: Autora.

**Figura 259** – Amostra 1 – Litologia: Filito/ Metabásica - h<sub>ótima</sub> – Ensaio triaxial PN.



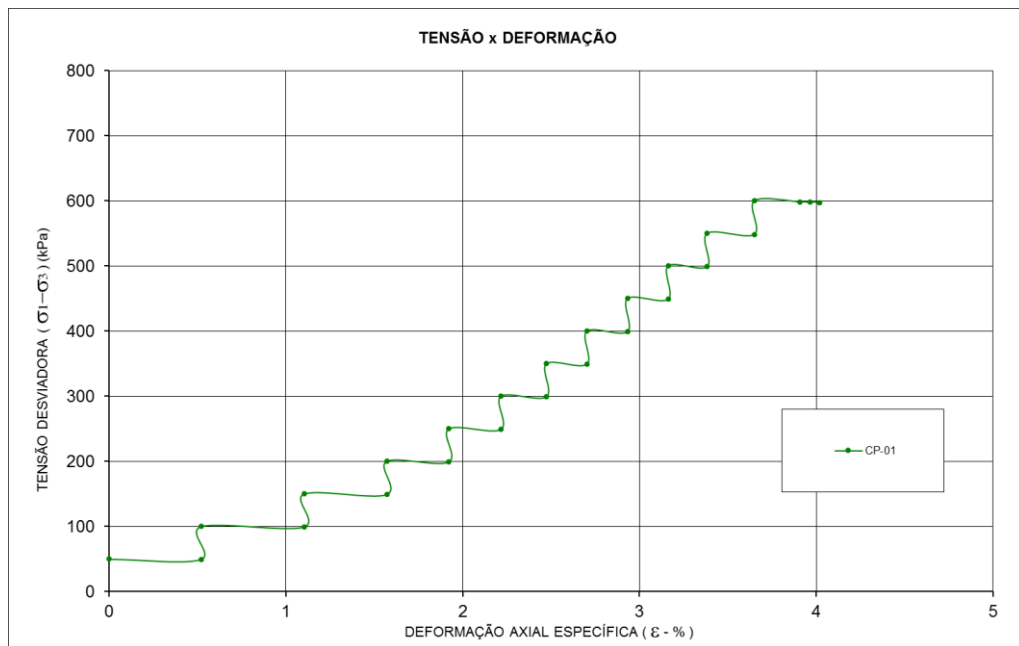
Fonte: Autora.

**Figura 260** – Amostra 1 – Litologia: Filito/ Metabásica - h<sub>ótima</sub> – Ensaio triaxial PN.



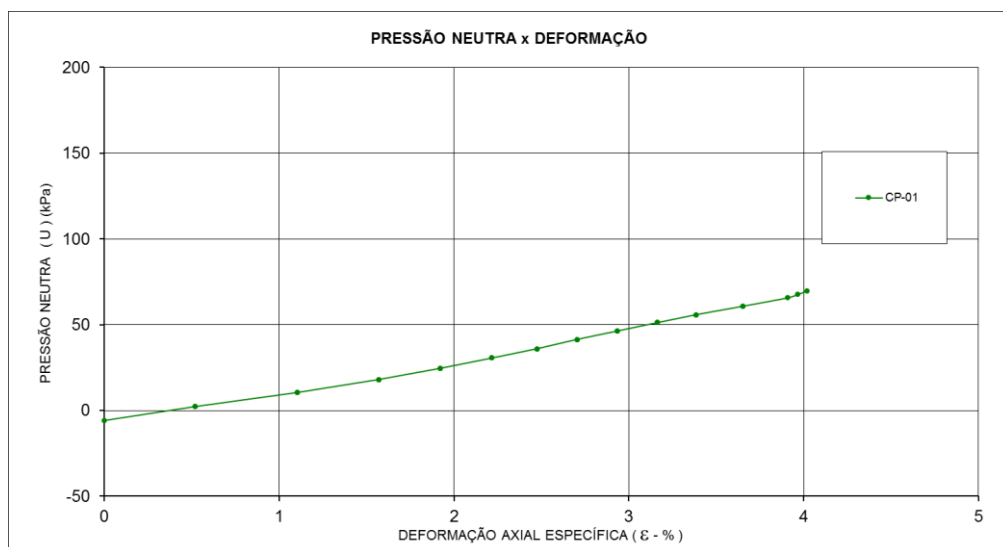
Fonte: Autora.

**Figura 261** – Amostra 1 – Litologia: Filito/ Metabásica - hótima + 2% – Ensaio triaxial PN.



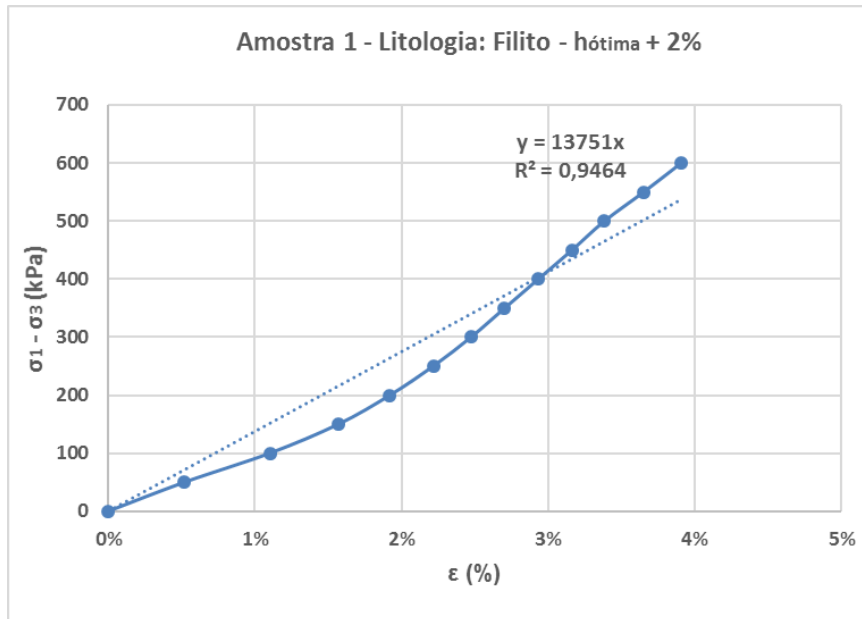
Fonte: Autora.

**Figura 262** – Amostra 1 – Litologia: Filito/ Metabásica - hótima + 2% – Ensaio triaxial PN.



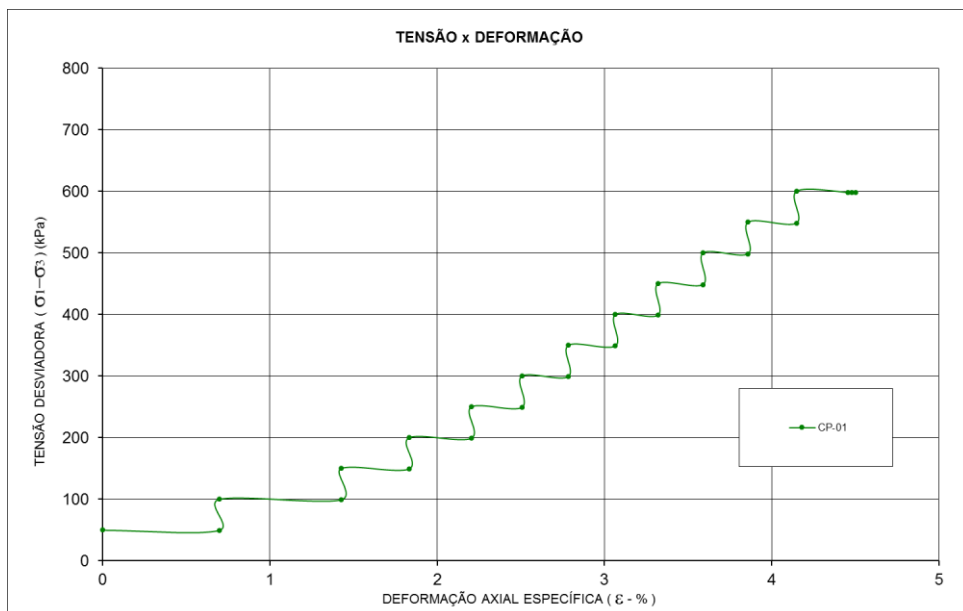
Fonte: Autora.

**Figura 263** – Amostra 1 – Litologia: Filito/ Metabásica - hótima + 2% – Ensaio triaxial PN.



Fonte: Autora.

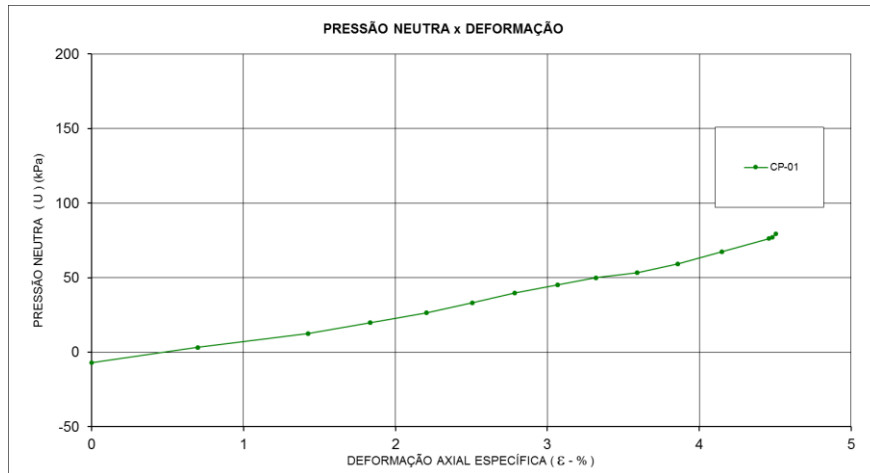
**Figura 264** – Amostra 1 – Litologia: Filito/ Metabásica - hótima + 4% – Ensaio triaxial PN.



Fonte: Autora.

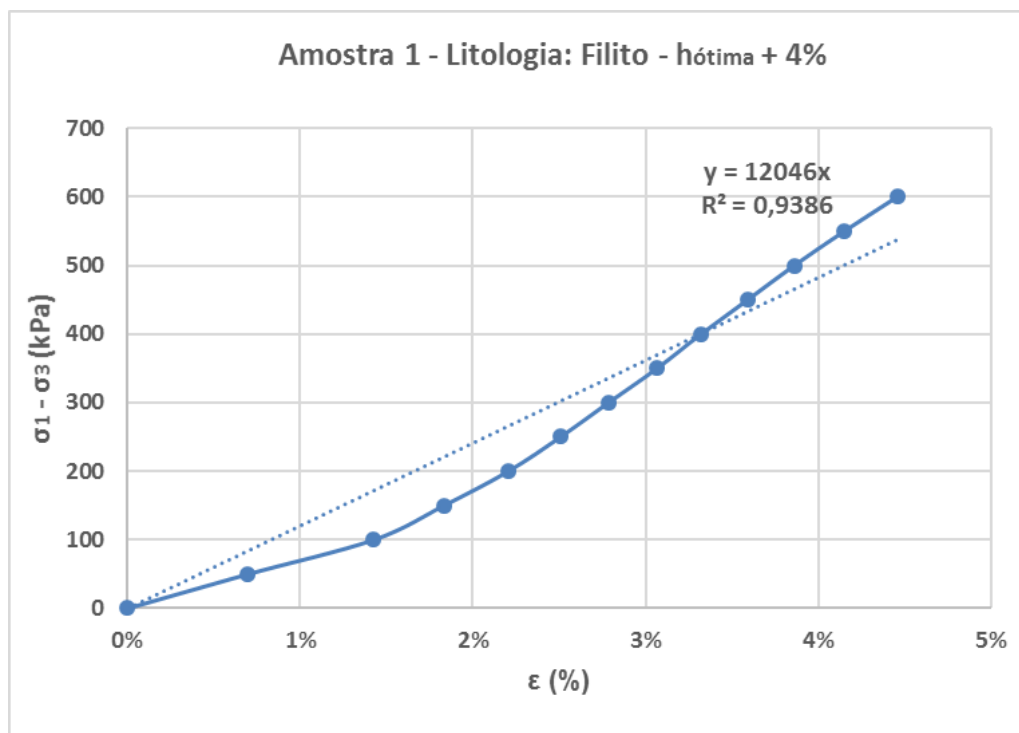


**Figura 265** – Amostra 1 – Litologia: Filito/ Metabásica - hótima + 4% – Ensaio triaxial PN.



Fonte: Autora.

**Figura 266** – Amostra 1 – Litologia: Filito/ Metabásica - hótima + 4% – Ensaio triaxial PN.

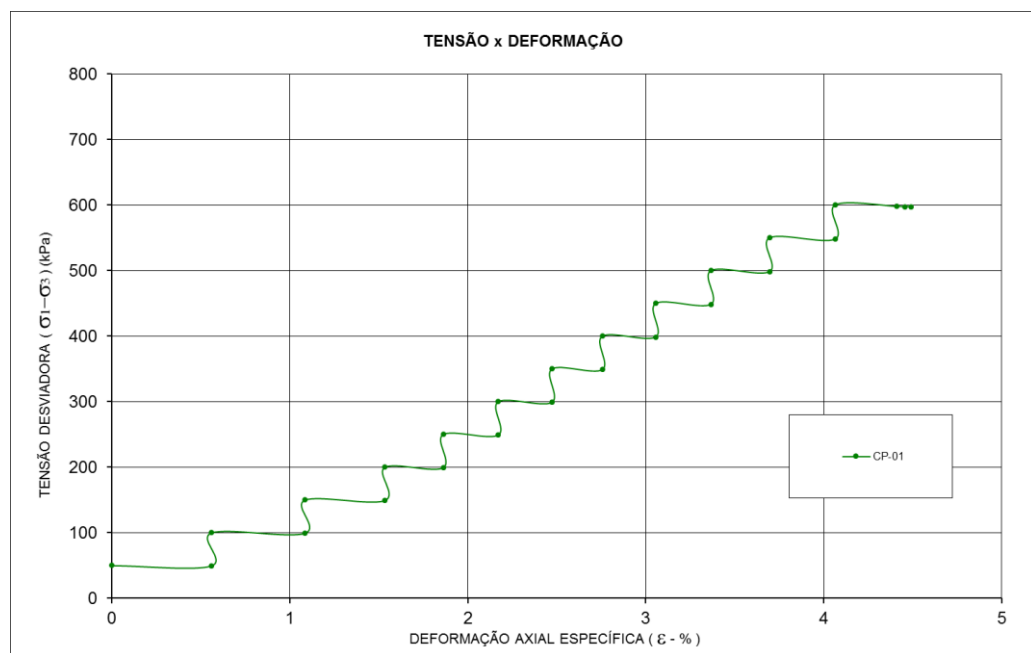


Fonte: Autora.

**Tabela 93** – Corpos de prova – Amostra 2 – Filito – Ensaio triaxial PN.

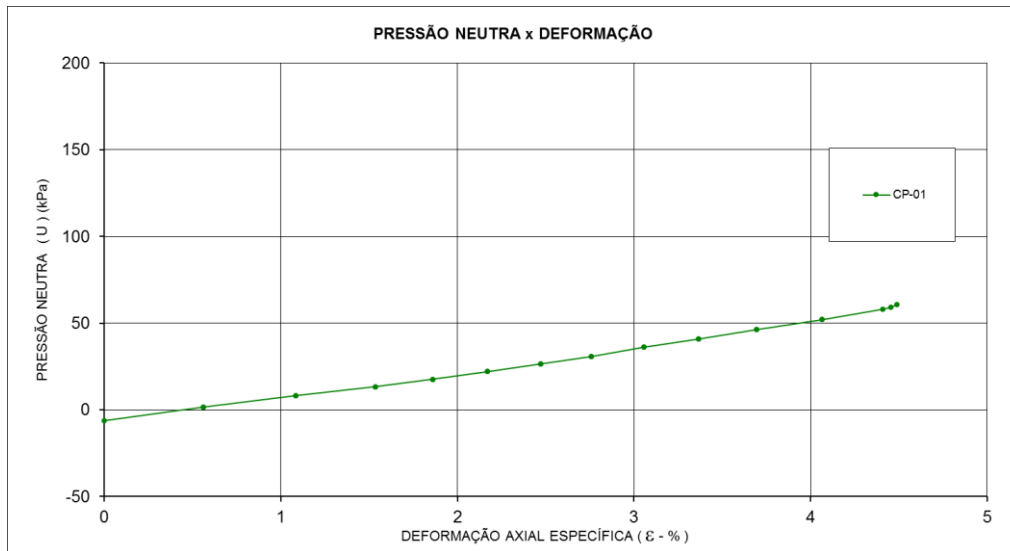
	CP - hótima	CP - hótima + 2%	CP - hótima + 4%	CP - hótima + 5%
Umidade média (%)	17,81	20,19	22,04	23,00
Grau de saturação (%)	65	74	80	84
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	15,89	15,84	15,86	15,87
Índice de Vazios	0,76	0,77	0,77	0,77
$\Delta h$ (%)	-0,29	2,09	3,94	4,90
GC	95%	95%	95%	95%

**Fonte:** Autora.

**Figura 267** – Amostra 2 – Litologia: Filito - hótima – Ensaio triaxial PN.

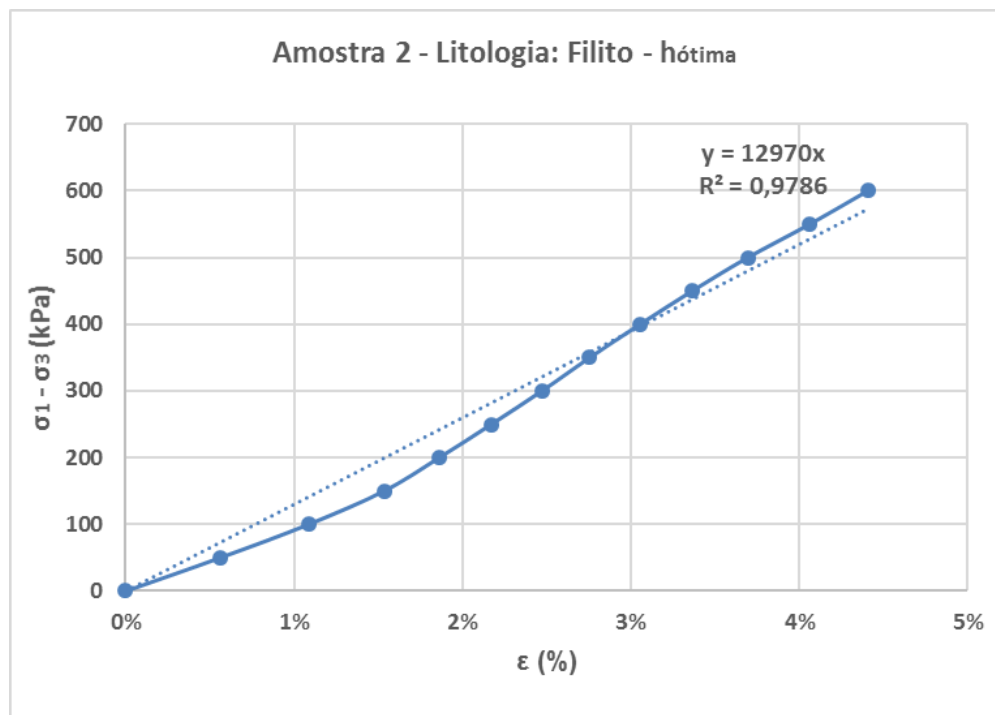
**Fonte:** Autora.

**Figura 268** – Amostra 2 – Litologia: Filito - hótima – Ensaio triaxial PN.



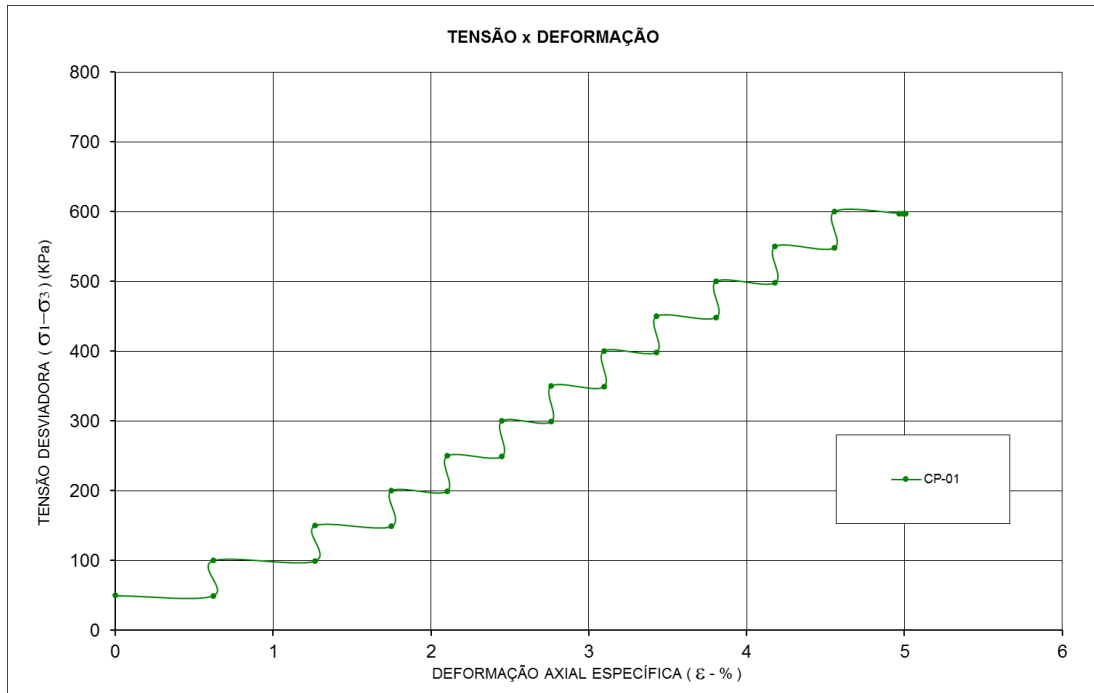
Fonte: Autora.

**Figura 269** – Amostra 2 – Litologia: Filito - hótima – Ensaio triaxial PN.



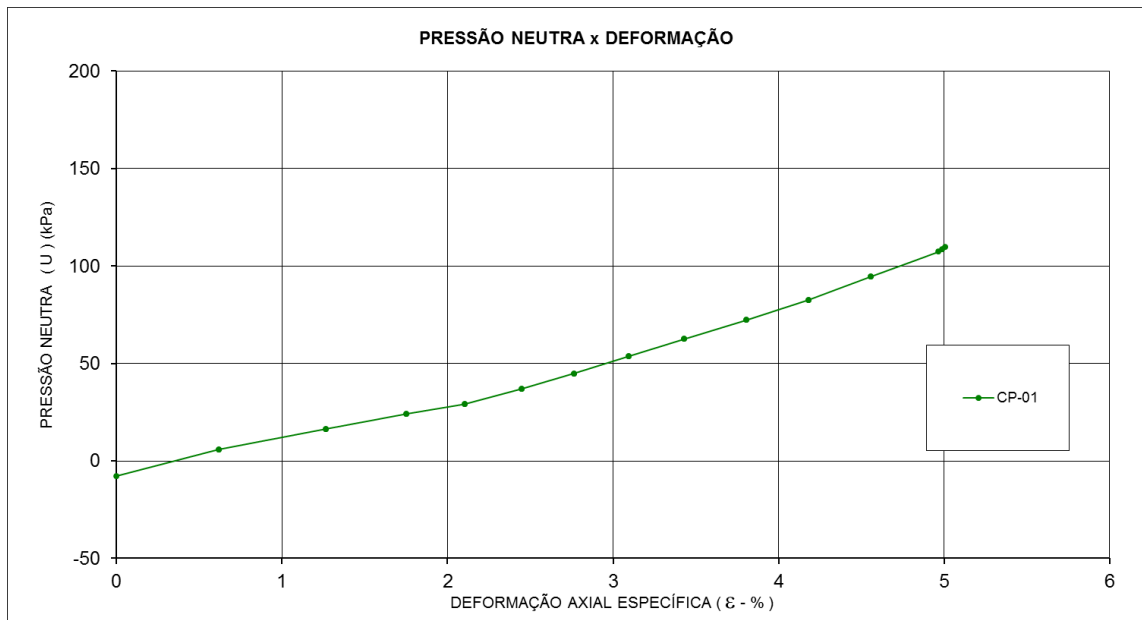
Fonte: Autora.

**Figura 270 – Amostra 2 – Litologia: Filito - hótima + 2% – Ensaio triaxial PN.**



**Fonte:** Autora.

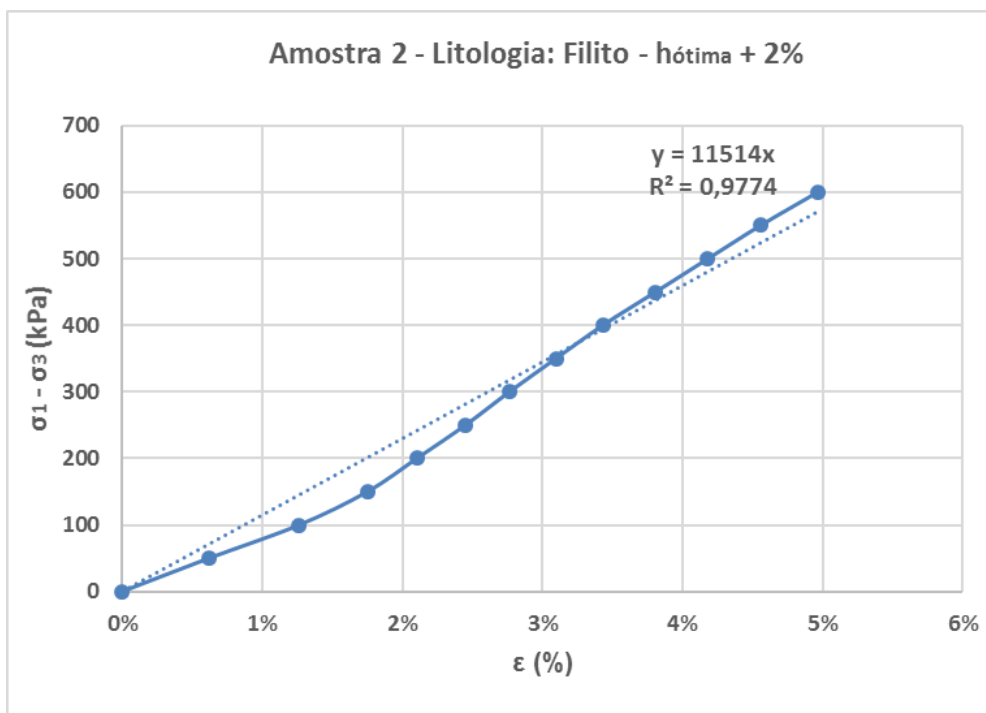
**Figura 271 – Amostra 2 – Litologia: Filito - hótima + 2% – Ensaio triaxial PN.**



**Fonte:** Autora.

**Figura 272** – Amostra 2 – Litologia: Filito - hótima + 2%.– Ensaio triaxial

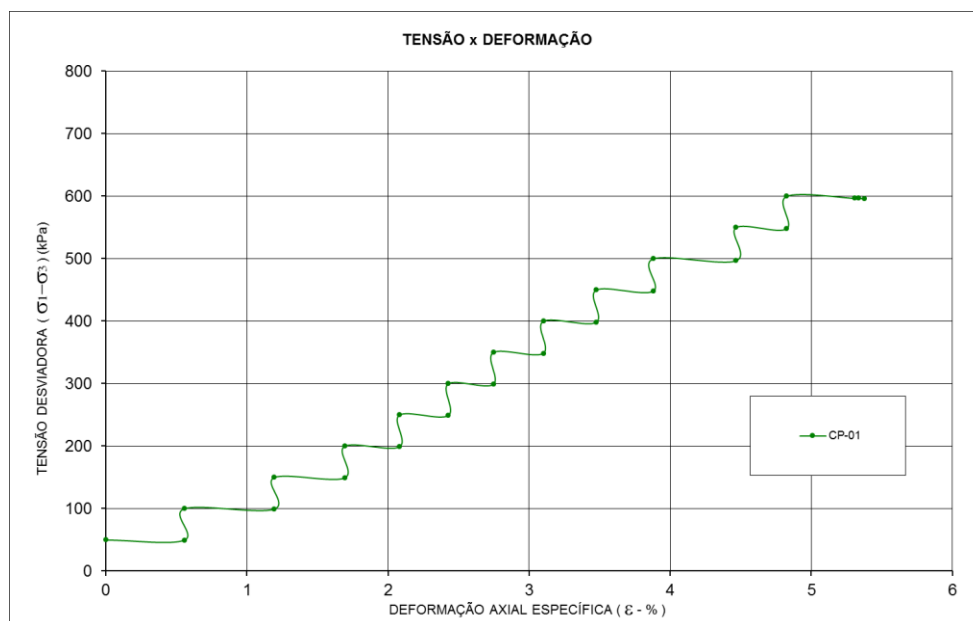
PN.



Fonte: Autora.

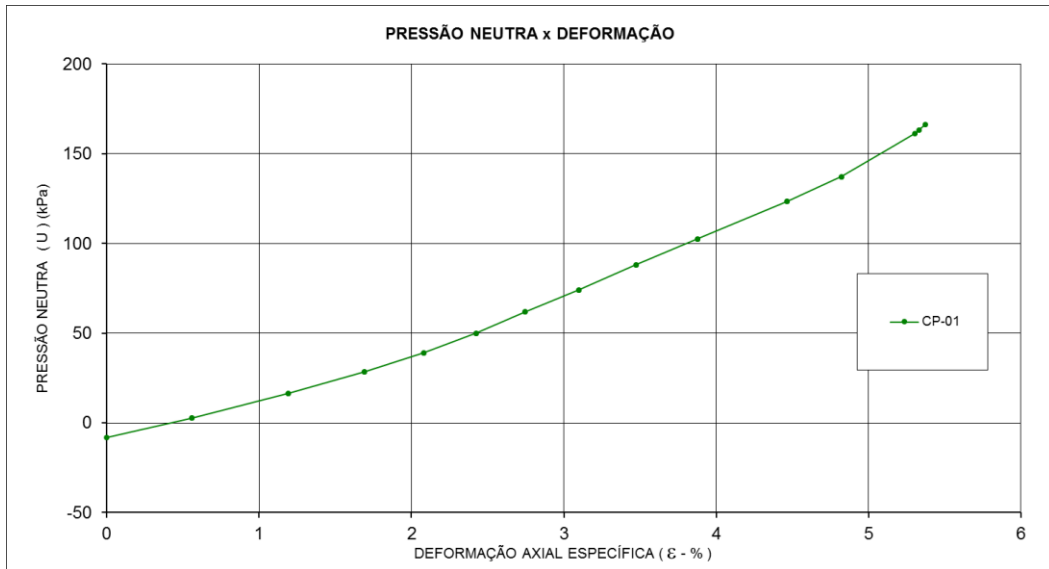
**Figura 273** – Amostra 2 – Litologia: Filito - hótima + 4% – Ensaio triaxial

PN.



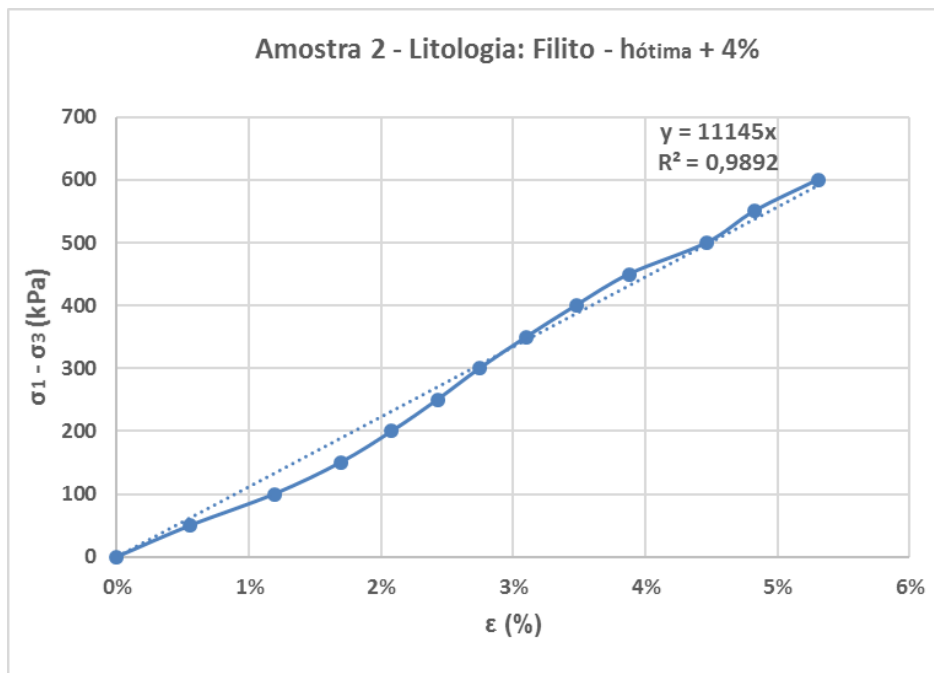
Fonte: Autora.

**Figura 274 – Amostra 2 – Litologia: Filito - hótima + 4% – Ensaio triaxial PN.**



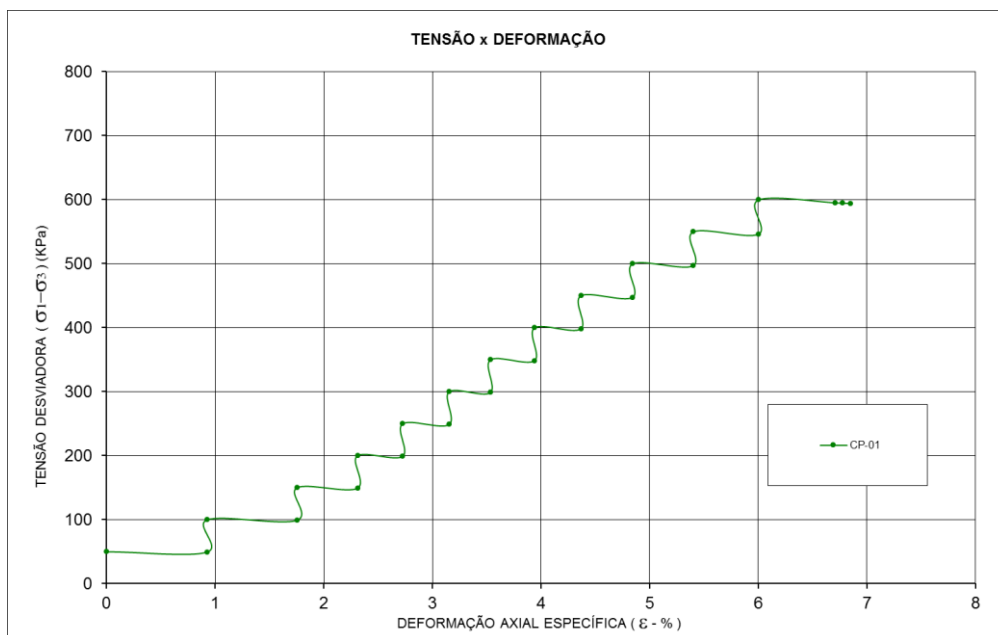
**Fonte:** Autora.

**Figura 275 – Amostra 2 - Litologia: Filito - hótima + 4% – Ensaio triaxial PN.**



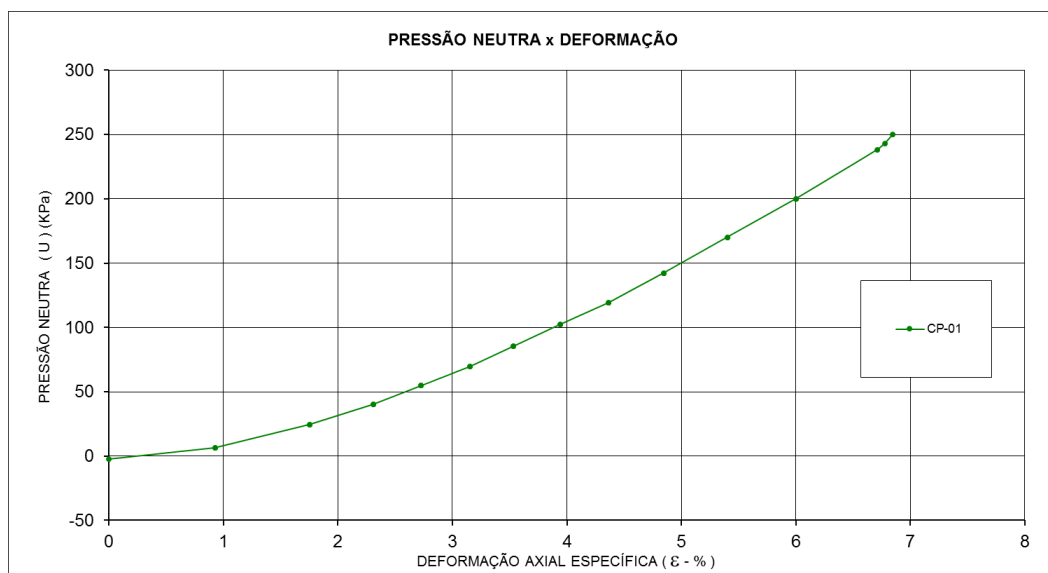
**Fonte:** Autora.

**Figura 276** – Amostra 2 – Litologia: Filito - hótima + 5% – Ensaio triaxial PN.



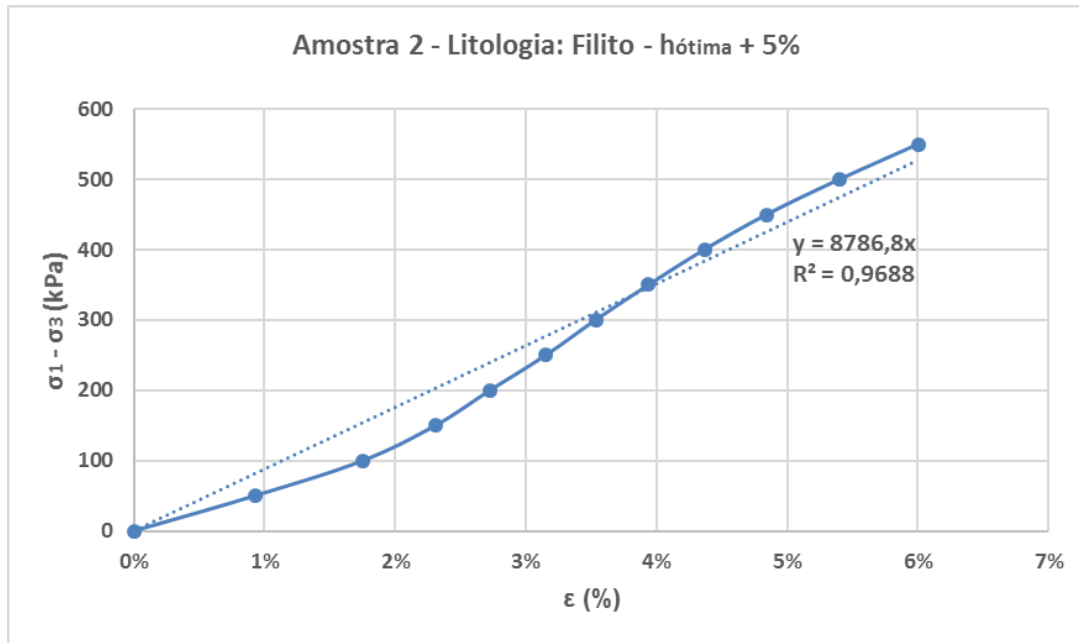
Fonte: Autora.

**Figura 277** – Amostra 2 - Litologia: Filito - hótima + 5% – Ensaio triaxial PN.



Fonte: Autora.

**Figura 278** – Amostra 2 – Litologia: Filito - hótima + 5% – Ensaio triaxial PN.



**Fonte:** Autora.



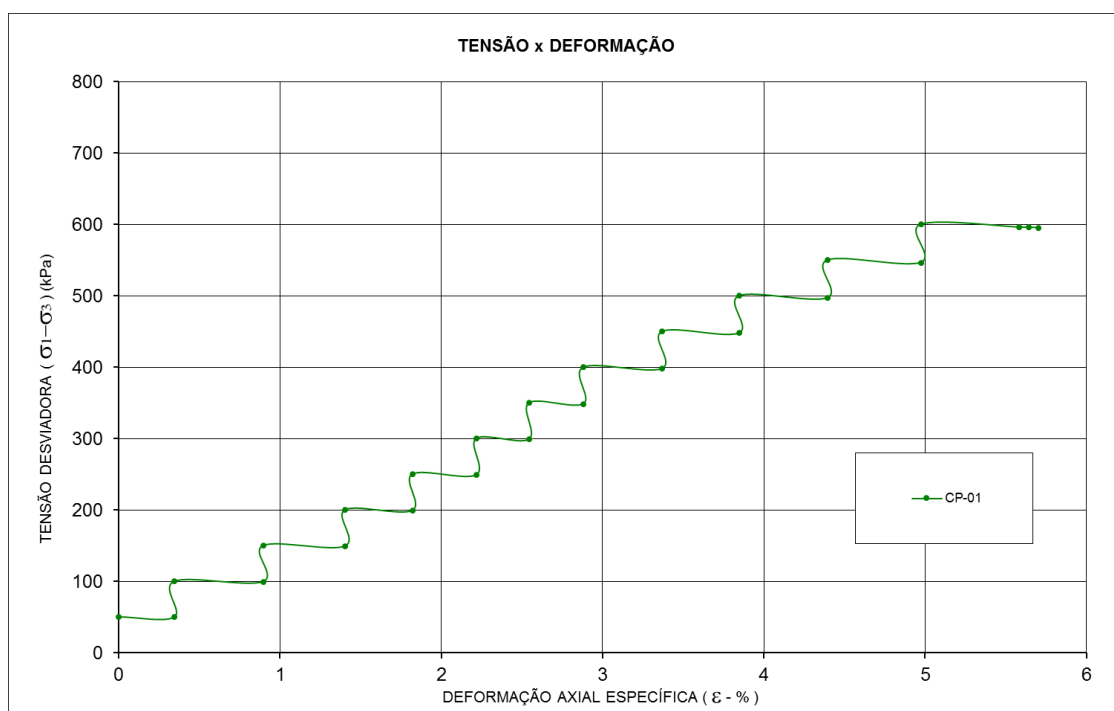
**Tabela 94 –** Corpos de prova – Amostra 4 – Ultramilonito – Ensaio triaxial

PN.

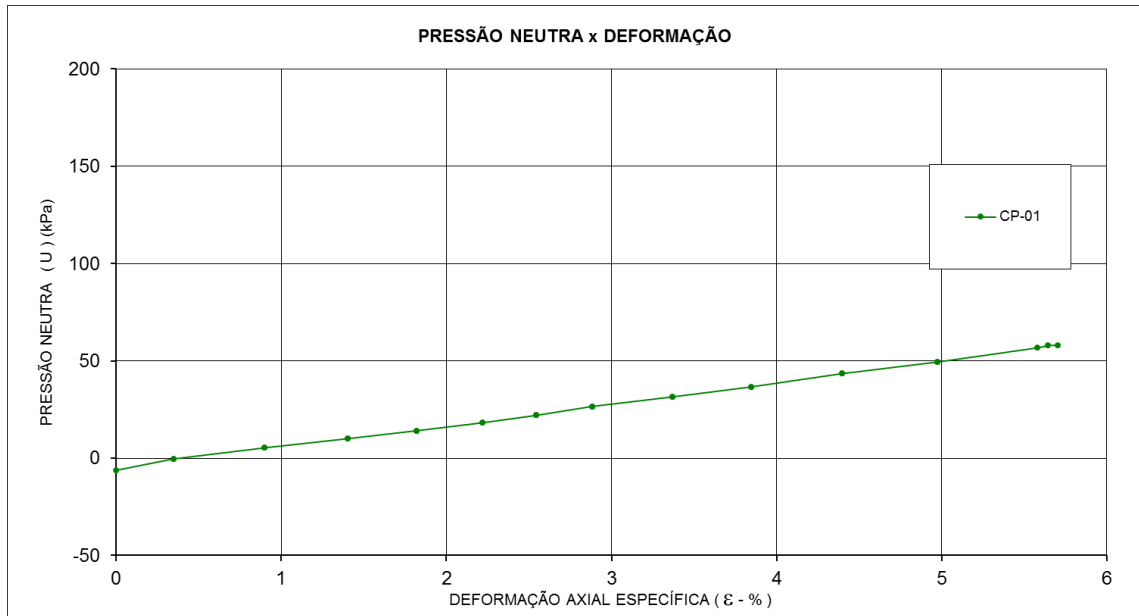
	CP - hótima	CP - hótima + 2%	CP - hótima + 4%
Umidade média (%)	18,76	20,91	22,95
Grau de saturação (%)	57	63	69
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	14,65	14,63	14,63
Índice de Vazios	0,95	0,95	0,95
$\Delta h$ (%)	-0,14	2,01	4,05
GC	95%	95%	95%

**Fonte:** Autora.**Figura 279 –** Amostra 4 – Litologia: Ultramilonito - hótima – Ensaio triaxial

PN.

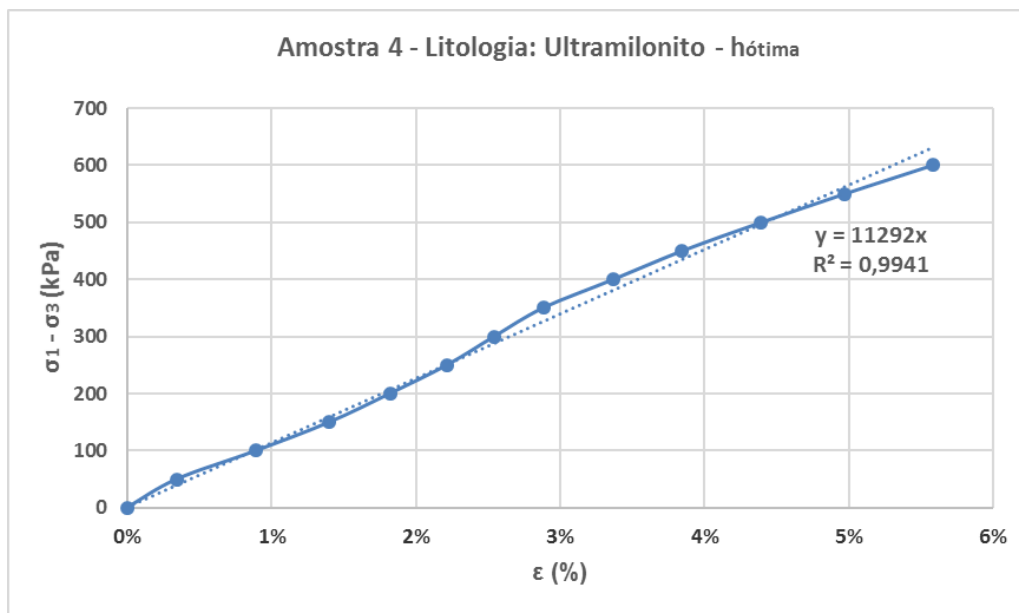
**Fonte:** Autora.

**Figura 280** – Amostra 4 – Litologia: Ultramilonito - hótima – Ensaio triaxial PN.



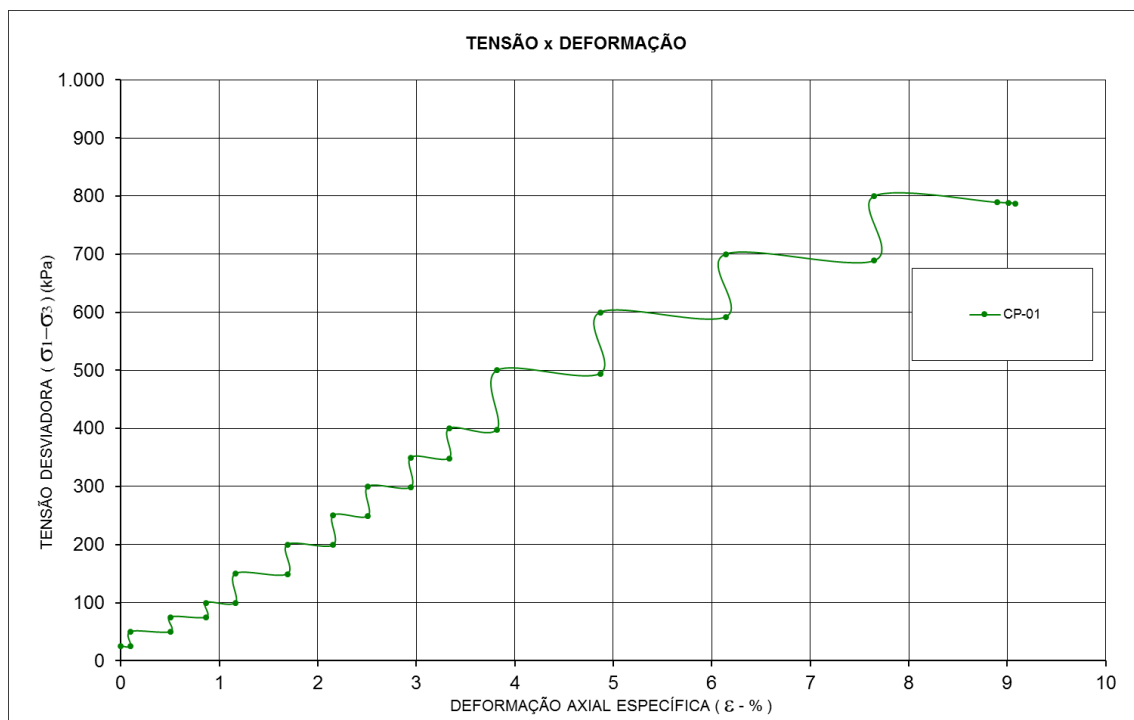
Fonte: Autora.

**Figura 281** – Amostra 4 – Litologia: Ultramilonito - hótima – Ensaio triaxial PN.



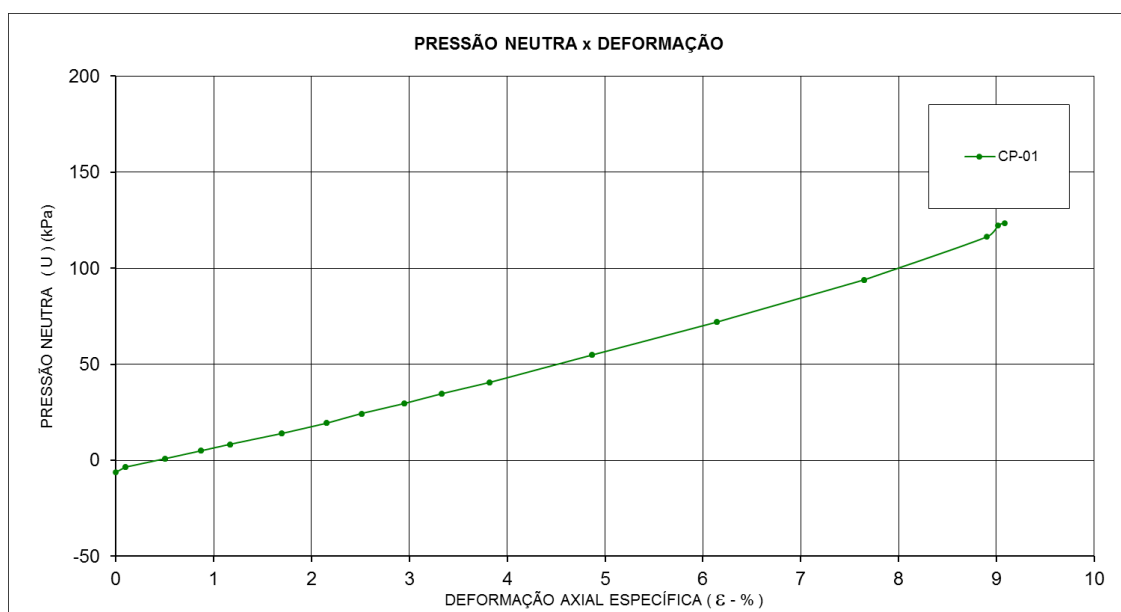
Fonte: Autora.

**Figura 282** – Amostra 4 – Litologia: Ultramilonito - hótima + 2% – Ensaio triaxial PN.



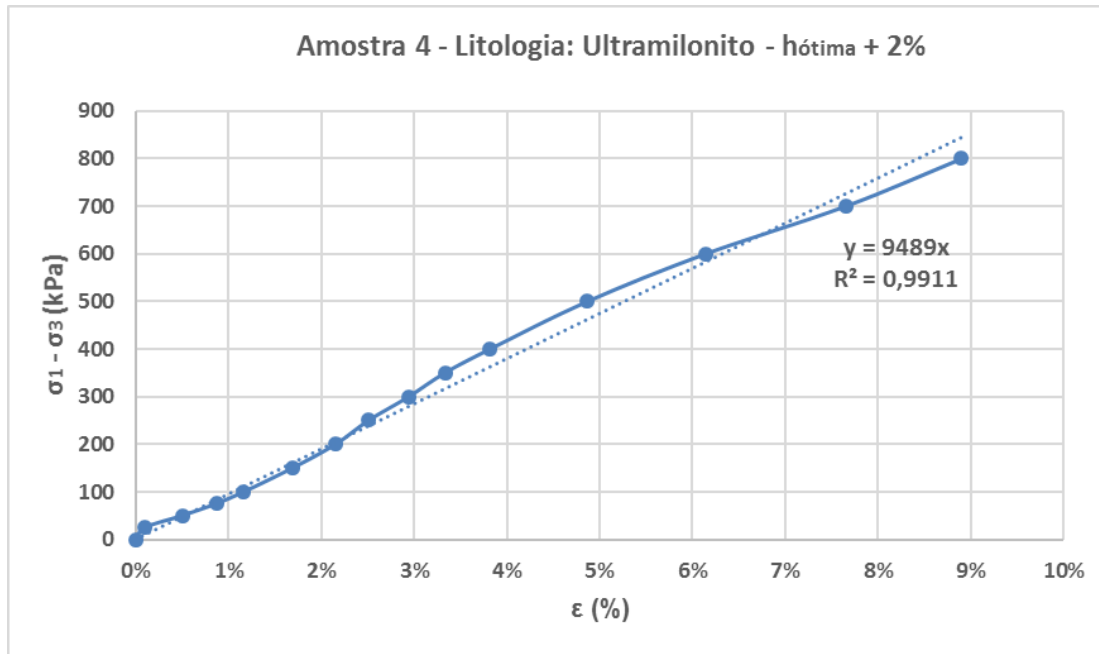
Fonte: Autora.

**Figura 283** – Amostra 4 – Litologia: Ultramilonito - hótima + 2% – Ensaio triaxial PN.



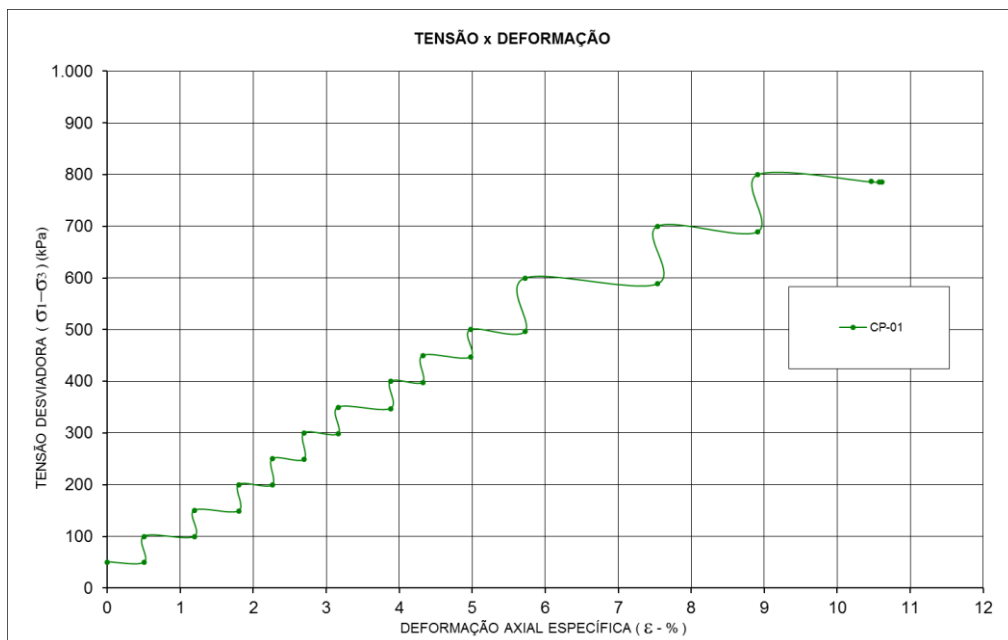
Fonte: Autora.

**Figura 284** – Amostra 4 – Litologia: Ultramilonito - hótima + 2% – Ensaio triaxial PN.



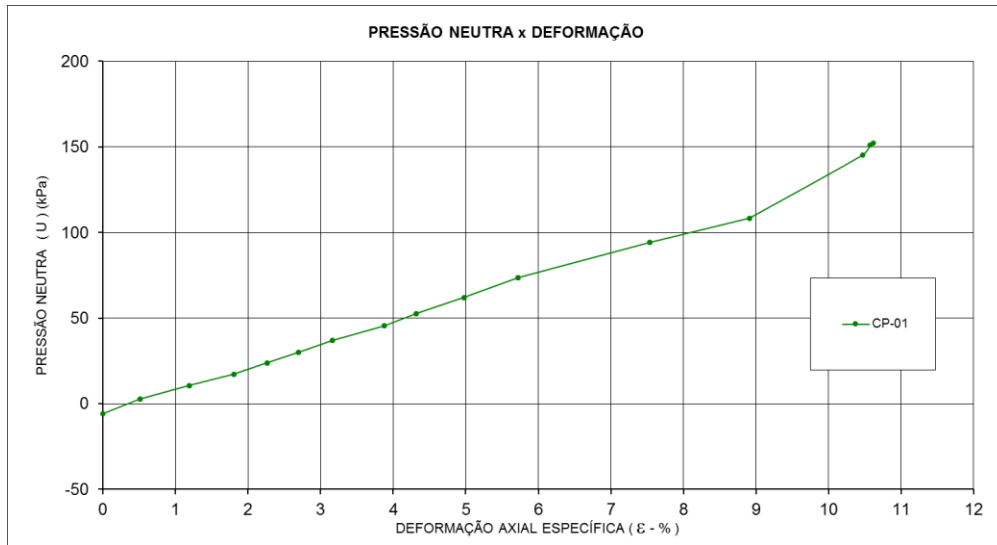
Fonte: Autora.

**Figura 285** – Amostra 4 – Litologia: Ultramilonito - hótima + 4% – Ensaio triaxial PN.



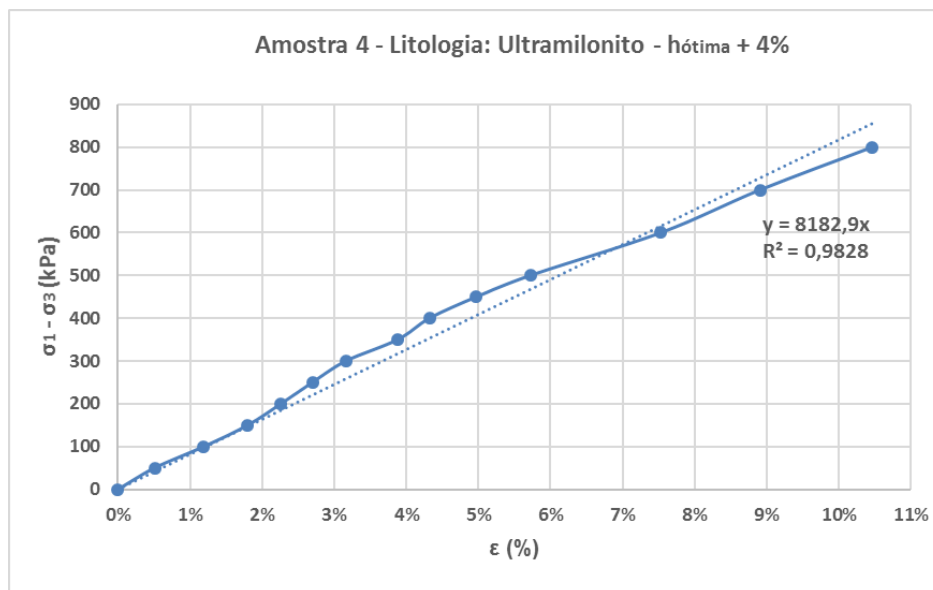
Fonte: Autora.

**Figura 286** – Amostra 4 – Litologia: Ultramilonito - hótima + 4% – Ensaio triaxial PN.



Fonte: Autora.

**Figura 287** – Amostra 4 – Litologia: Ultramilonito - hótima + 4% – Ensaio triaxial PN.



Fonte: Autora.

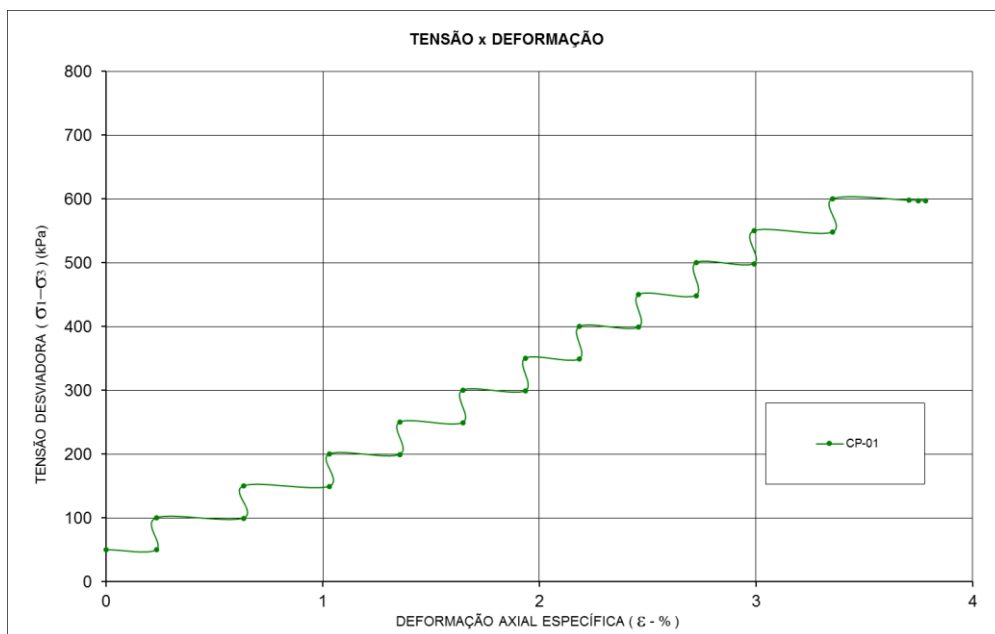
**Tabela 95 –** Corpos de prova – Amostra 5 – Metabásica – Ensaio triaxial

PN.

	CP - hótima	CP - hótima + 2%	CP - hótima + 4%
Umidade média (%)	21,94	23,81	25,60
Grau de saturação (%)	56	61	66
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	13,70	13,71	13,73
Índice de Vazios	1,16	1,16	1,16
$\Delta h$ (%)	-0,06	1,81	3,60
GC	95%	95%	95%

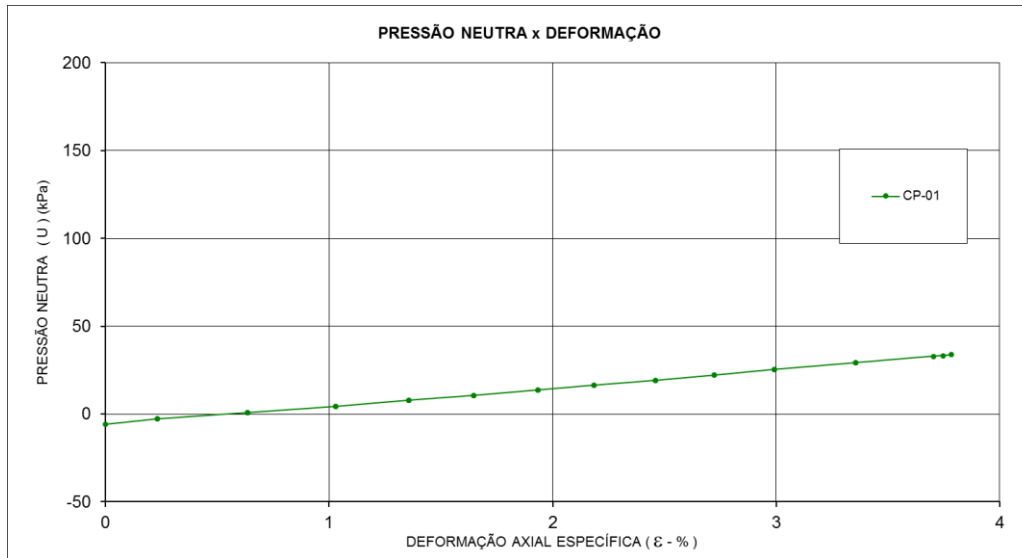
**Fonte:** Autora.**Figura 288 –**Amostra 5 - Litologia: Metabásica - hótima. – Ensaio triaxial

PN.

**Fonte:** Autora.

**Figura 289** – Amostra 5 – Litologia: Metabásica - hótima – Ensaio triaxial

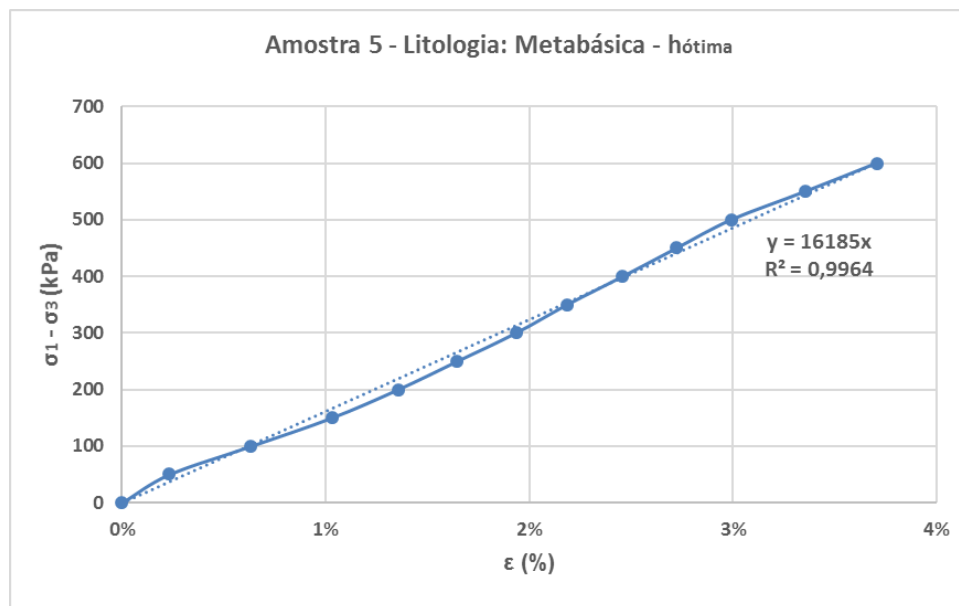
PN.



Fonte: Autora.

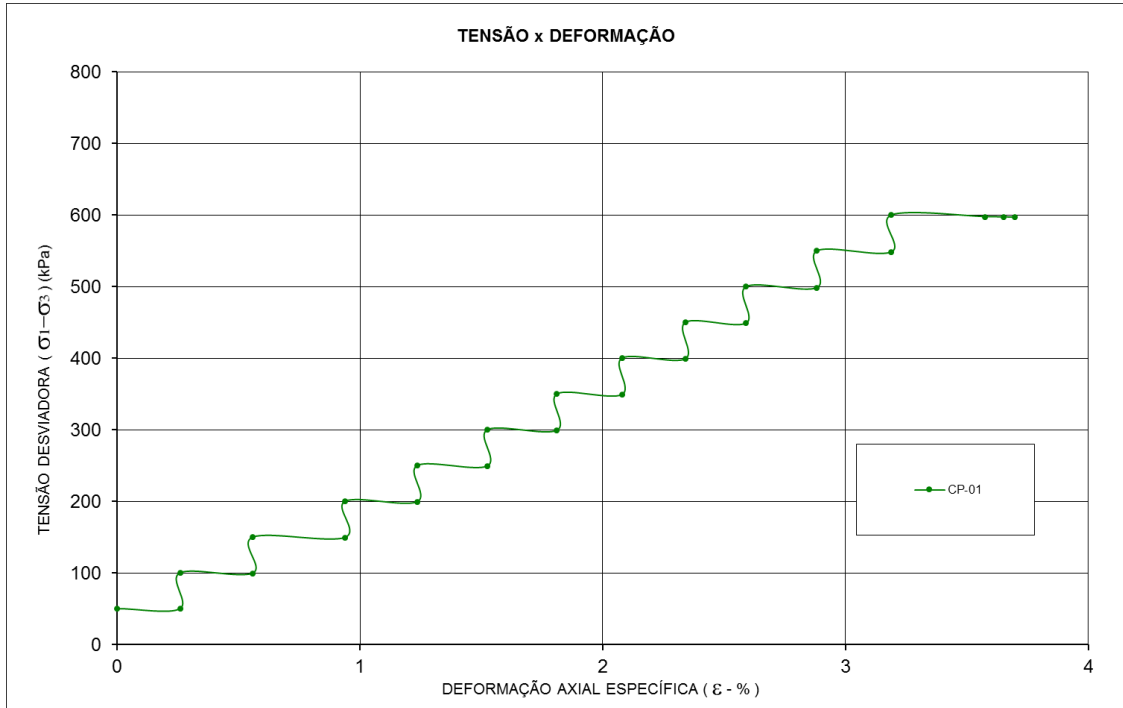
**Figura 290** – Amostra 5 – Litologia: Metabásica - hótima – Ensaio triaxial

PN.



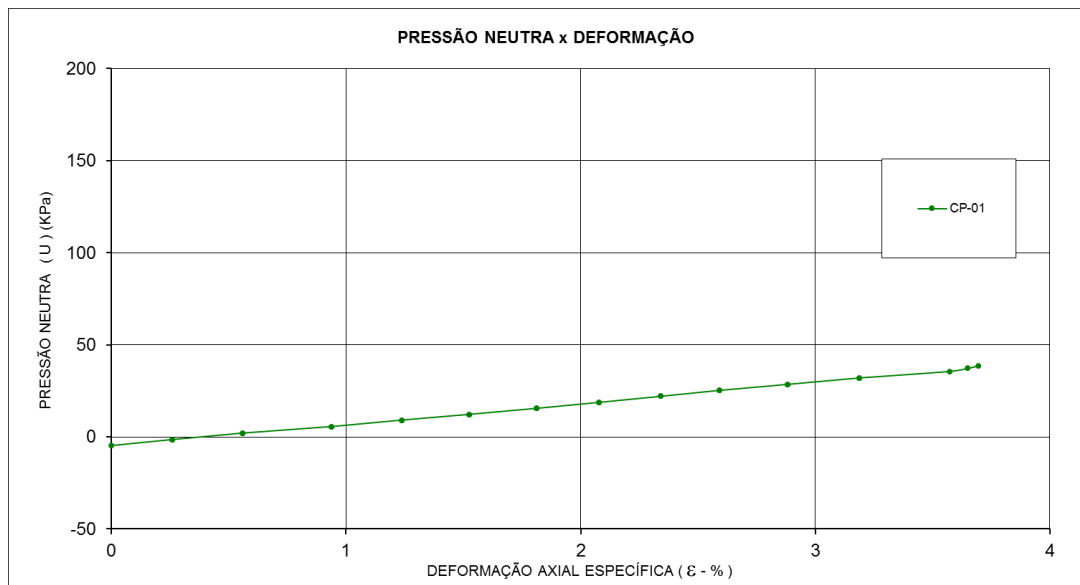
Fonte: Autora.

**Figura 291 – Amostra 5 – Litologia: Metabásica - hótima + 2% – Ensaio triaxial PN.**



Fonte: Autora.

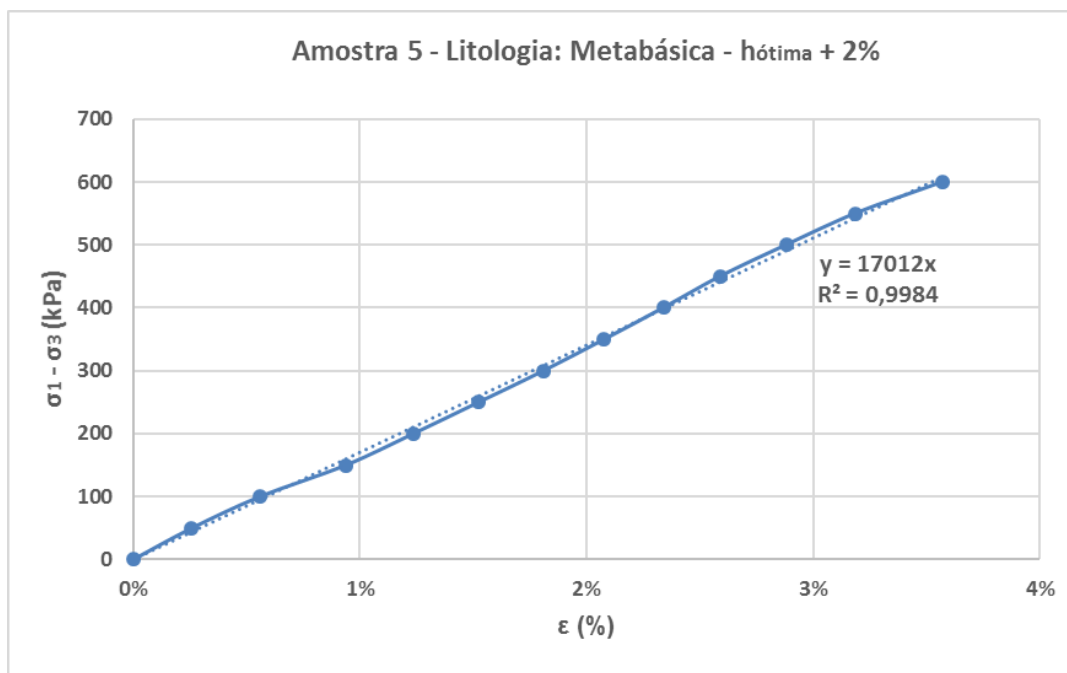
**Figura 292 – Amostra 5 – Litologia: Metabásica - hótima + 2% – Ensaio triaxial PN.**



Fonte: Autora.

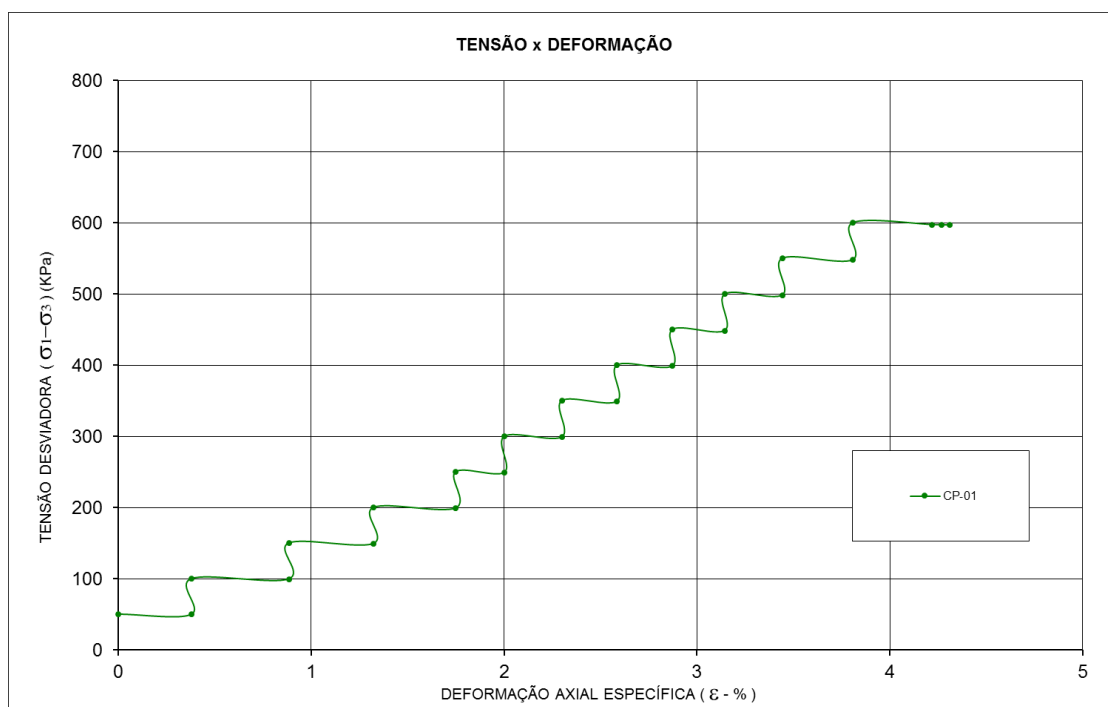


**Figura 293** – Amostra 5 – Litologia: Metabásica - hótima + 2%.– Ensaio triaxial PN.



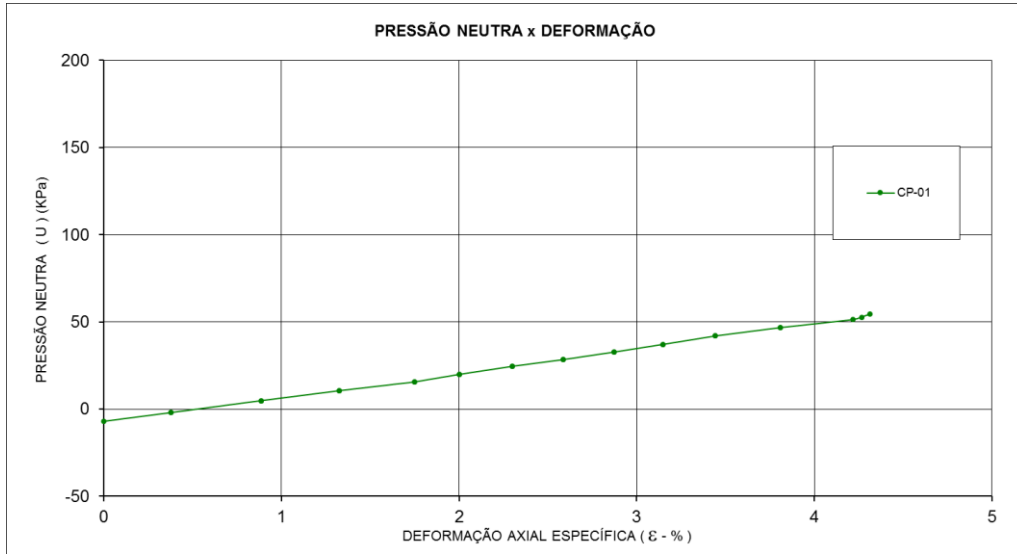
Fonte: Autora.

**Figura 294** – Amostra 5 – Litologia: Metabásica - hótima + 4% – Ensaio triaxial PN.



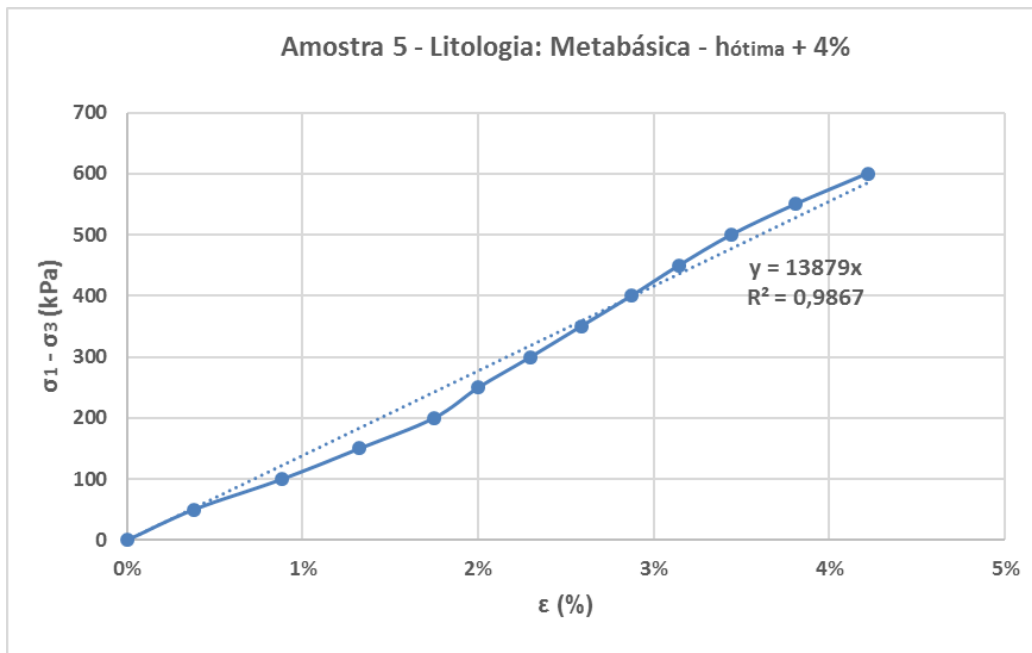
Fonte: Autora.

**Figura 295** – Amostra 5 – Litologia: Metabásica - hótima + 4% – Ensaio triaxial PN.



Fonte: Autora.

**Figura 296** – Amostra 5 – Litologia: Metabásica - hótima + 4%.– Ensaio triaxial PN.



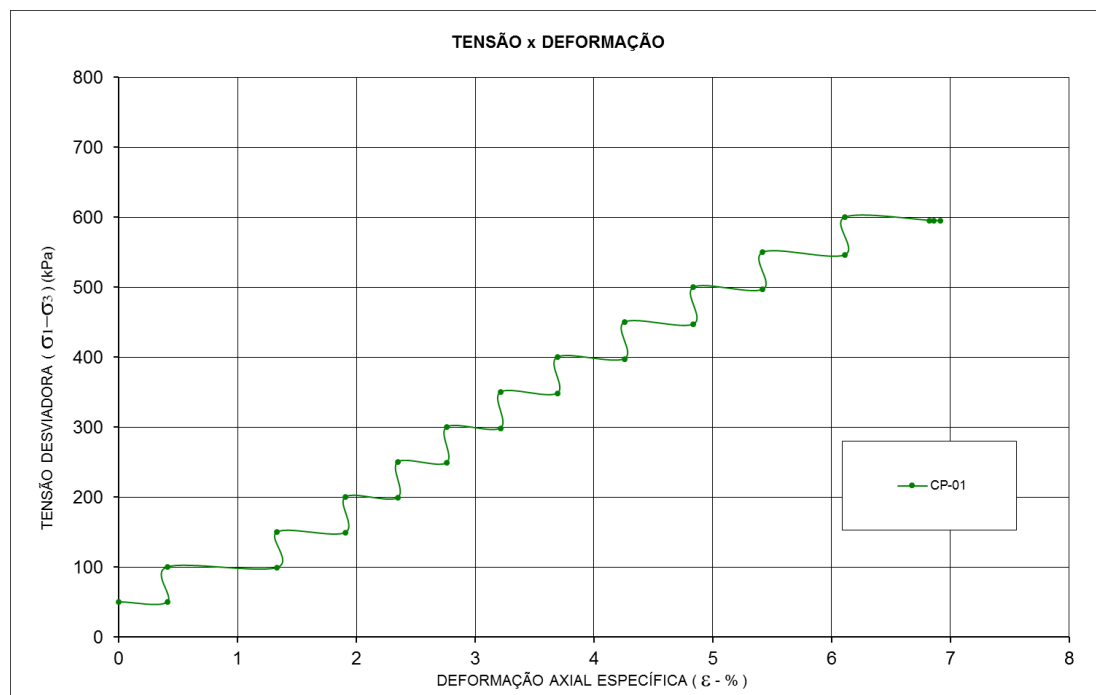
Fonte: Autora.

**Tabela 96 –** Corpos de prova – Amostra 6 – Ultramilonito – Ensaio triaxial PN.

	CP - hótima	CP - hótima + 2%	CP - hótima + 4%	CP - hótima + 5%
Umidade média (%)	22,96	25,18	26,93	27,97
Grau de saturação (%)	73	79	85	88
Peso específico seco (kN/m <sup>3</sup> )	14,84	14,82	14,85	14,81
Índice de Vazios	0,89	0,89	0,88	0,89
$\Delta h$ (%)	-0,24	1,98	3,73	4,77
GC	95%	95%	95%	95%

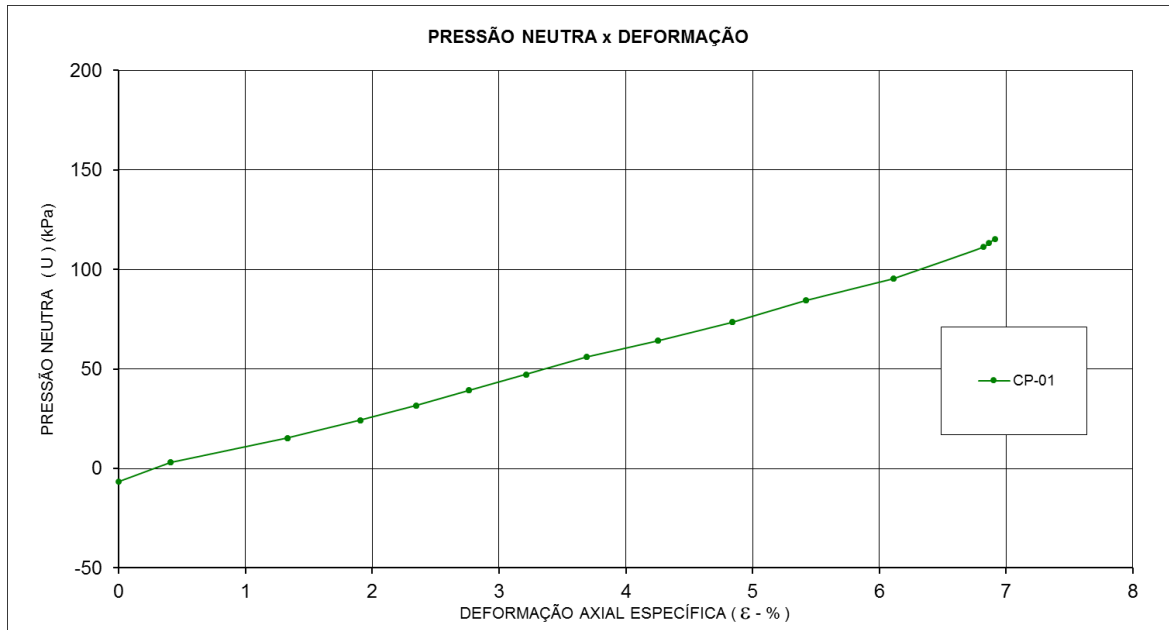
**Fonte:** Autora.

**Figura 297 –** Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - hótima – Ensaio triaxial PN.



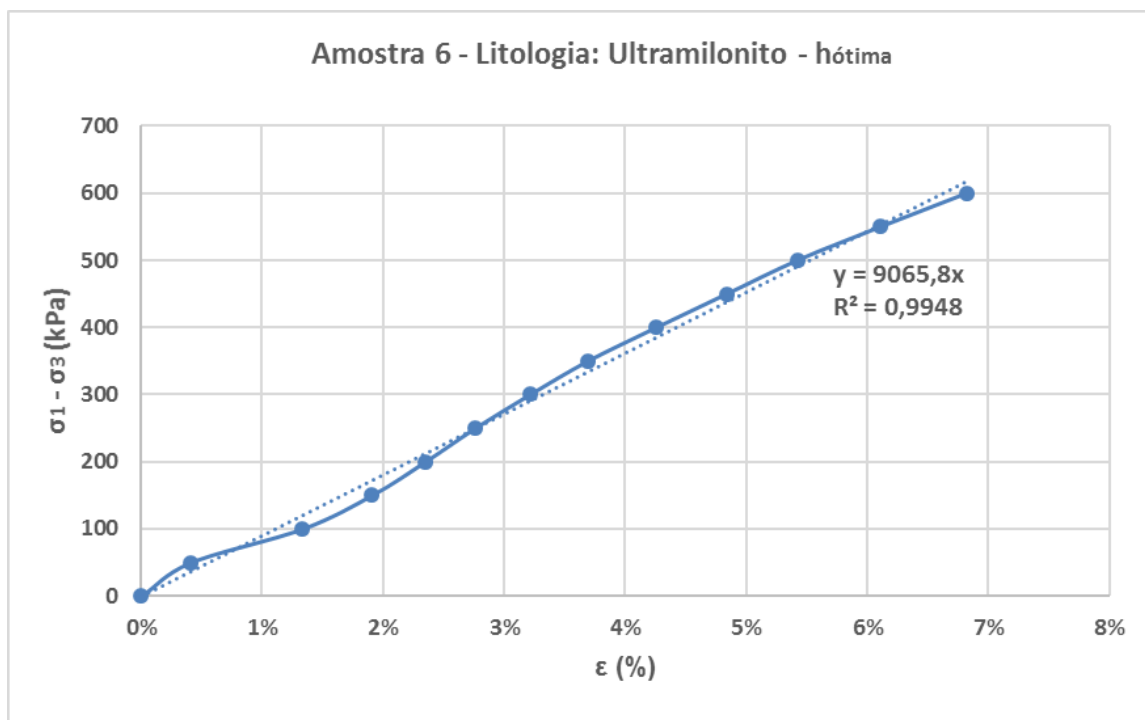
**Fonte:** Autora.

**Figura 298** – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - hótima – Ensaio triaxial PN.



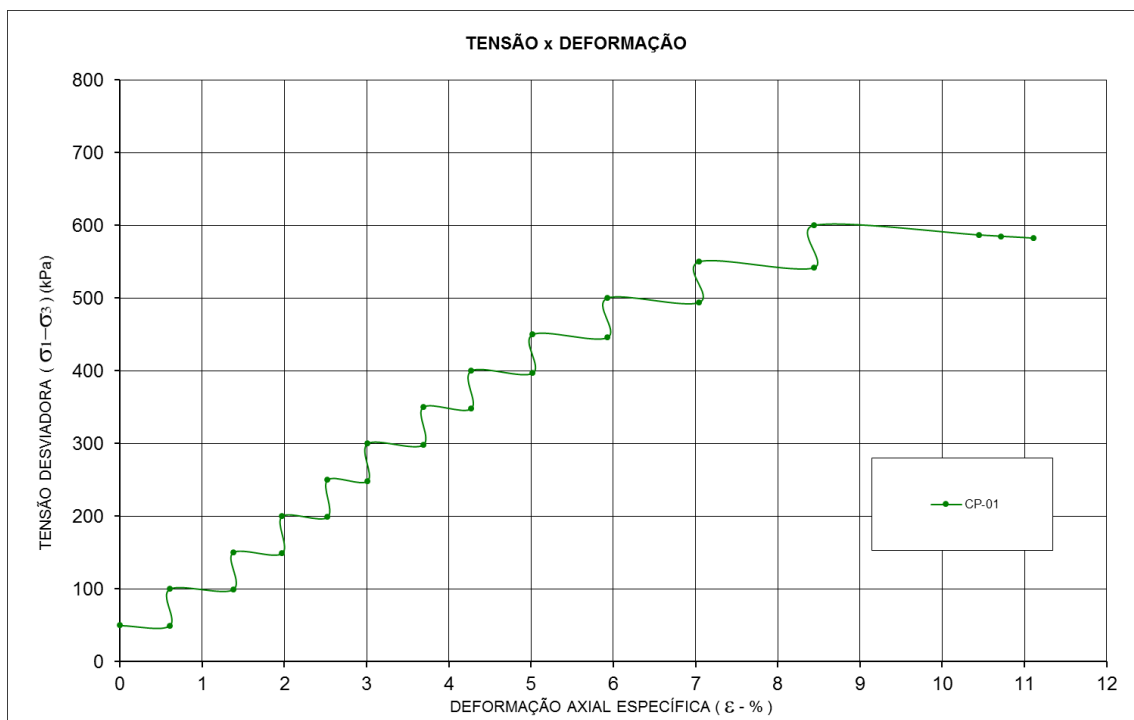
**Fonte:** Autora.

**Figura 299** – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - hótima – Ensaio triaxial PN.



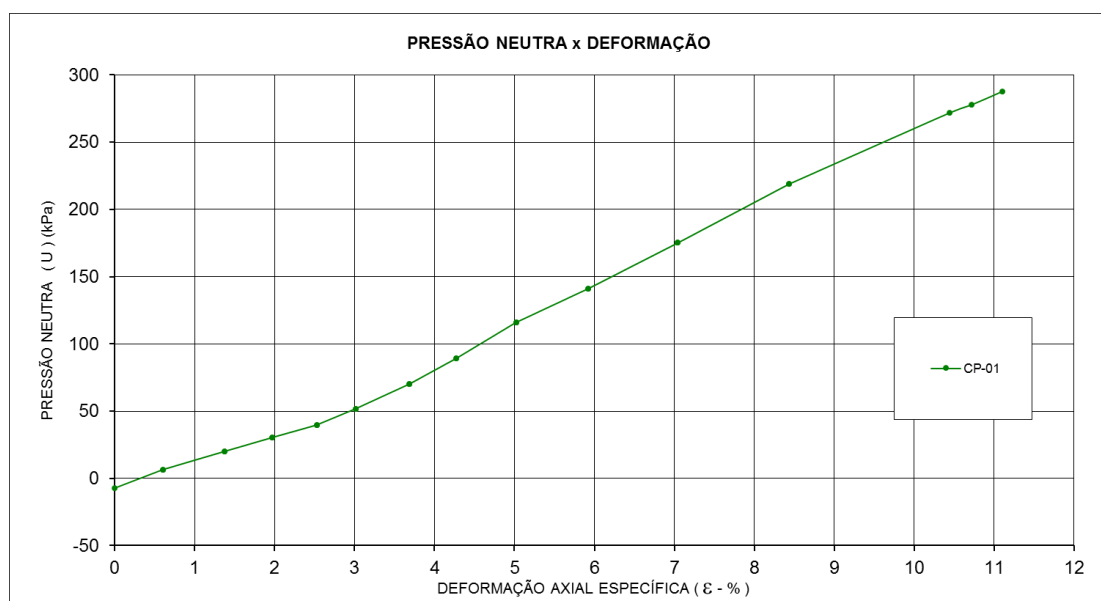
**Fonte:** Autora.

**Figura 300** – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - hótima + 2% – Ensaio triaxial PN.



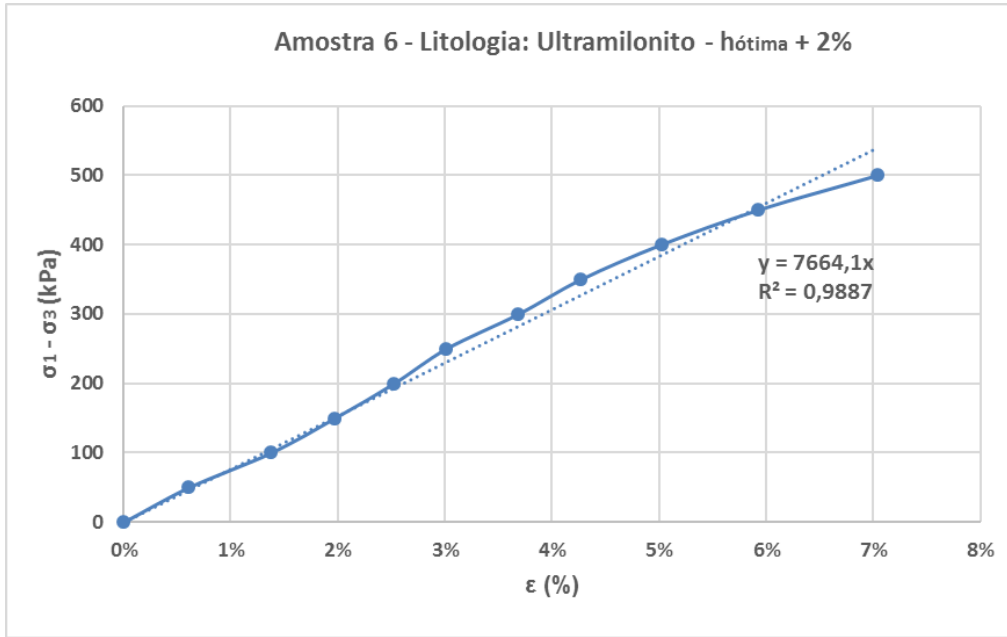
Fonte: Autora.

**Figura 301** – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - hótima + 2% – Ensaio triaxial PN.



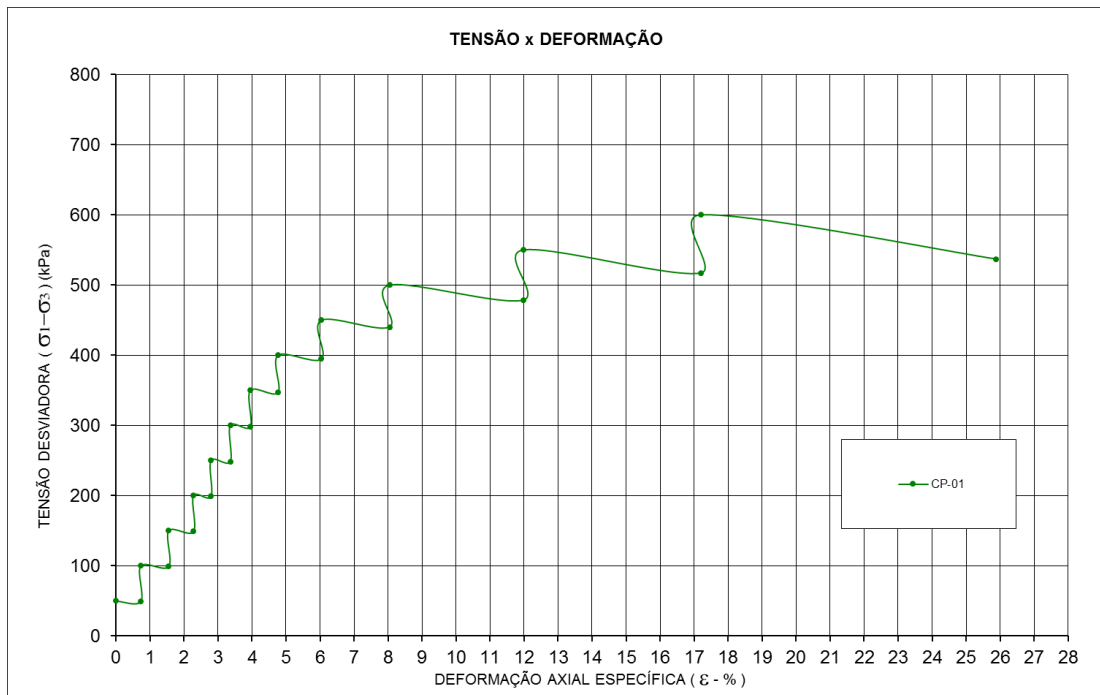
Fonte: Autora.

**Figura 302** – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - hótima + 2% – Ensaio triaxial PN.



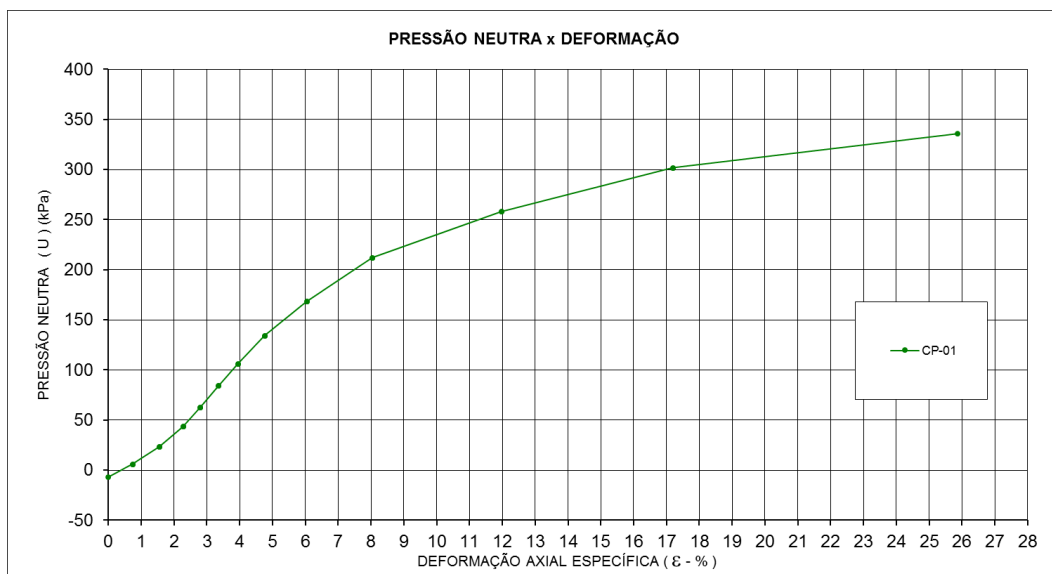
Fonte: Autora.

**Figura 303** – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - hótima + 4%.– Ensaio triaxial PN.



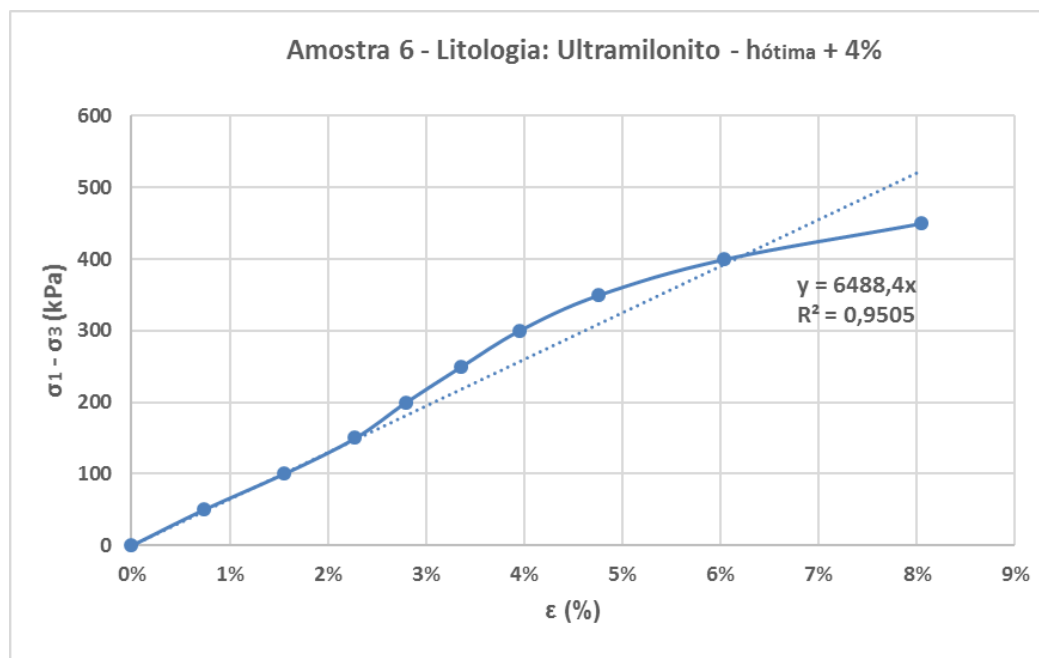
Fonte: Autora.

**Figura 304** – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> + 4%.– Ensaio triaxial PN.



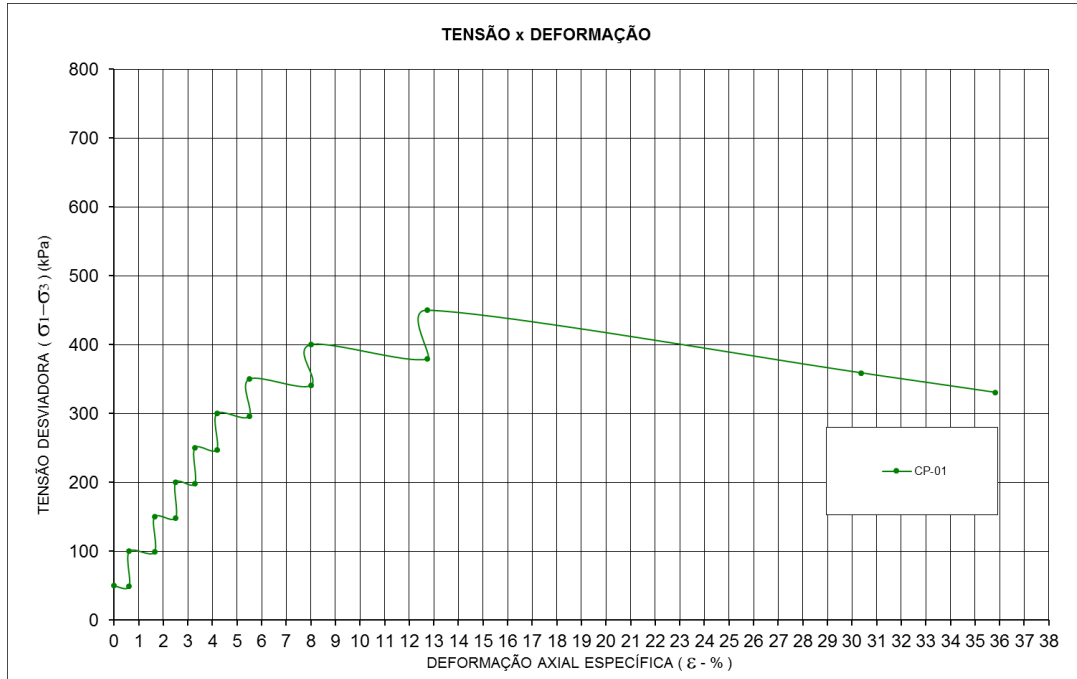
**Fonte:** Autora.

**Figura 305** – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - h<sub>ótima</sub> + 4%.– Ensaio triaxial PN.



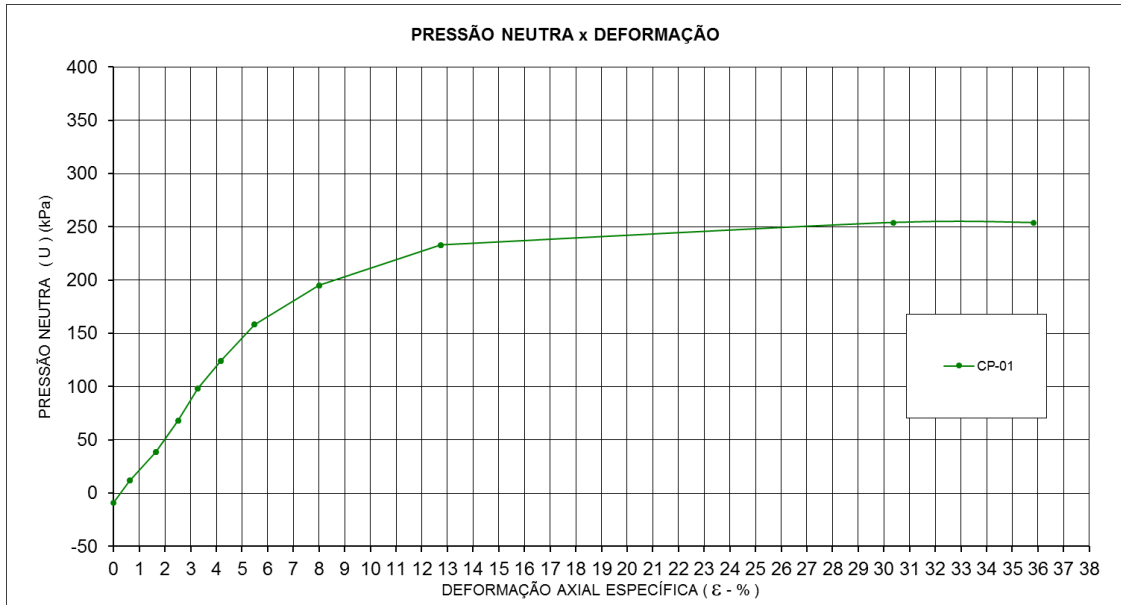
**Fonte:** Autora.

**Figura 306** – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - hótima + 5% – Ensaio triaxial PN.



Fonte: Autora.

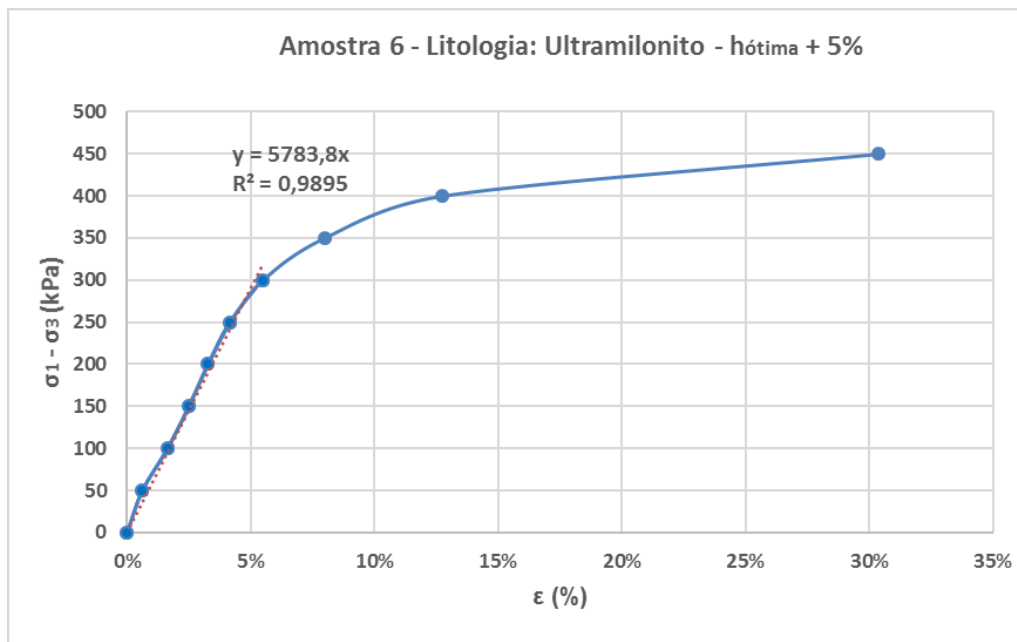
**Figura 307** – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - hótima + 5%.– Ensaio triaxial PN.



Fonte: Autora.



**Figura 308** – Amostra 6 – Litologia: Ultramilonito - hótima + 5%. – Ensaio triaxial PN.



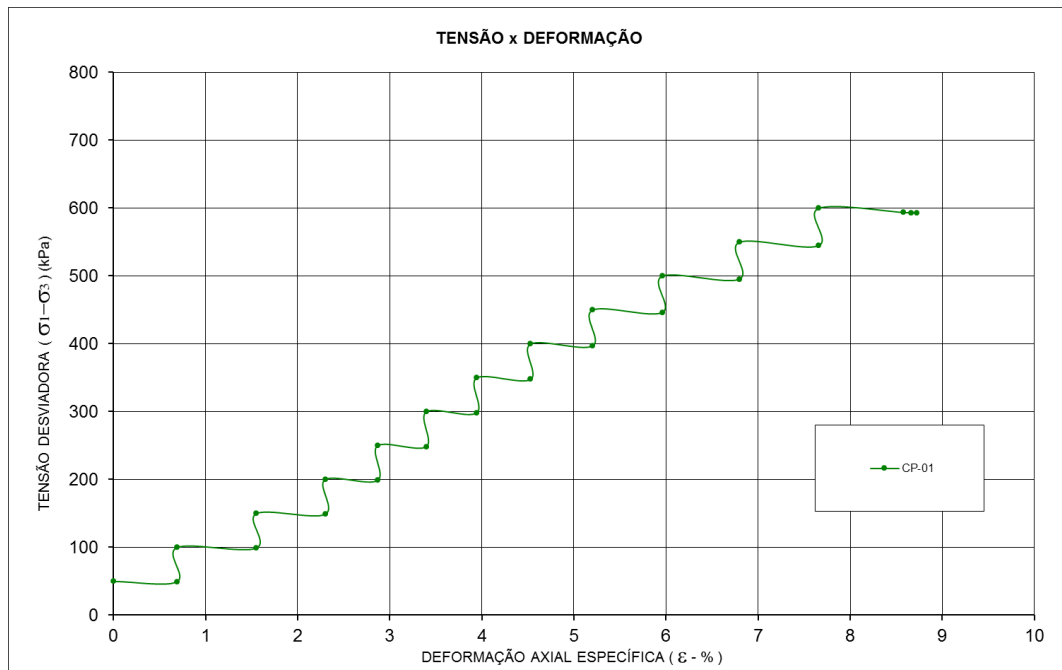
Fonte: Autora.

**Tabela 97** – Corpos de prova – Amostra 7 - Granito pouco milonitizado – Ensaio triaxial PN.

	CP - hótima	CP - hótima + 2%	CP - hótima + 4%	CP - hótima + 5%
Umidade média (%)	28,47	31,12	33,07	33,71
Grau de saturação (%)	71	77	82	84
Peso específico seco (kN/m³)	13,07	13,00	13,01	13,04
Índice de Vazios	1,10	1,11	1,11	1,10
$\Delta h$ (%)	-0,33	2,32	4,27	4,91
GC	95%	95%	95%	95%

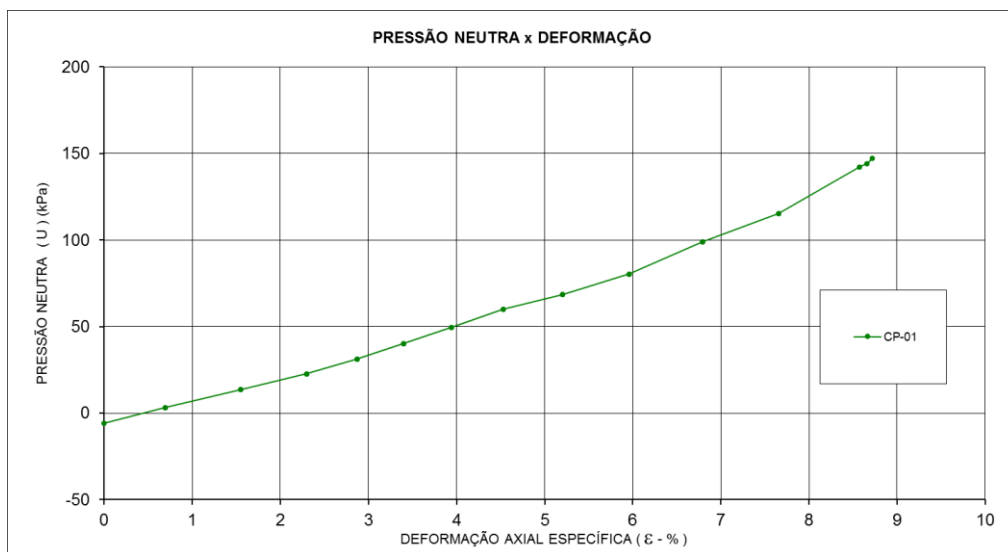
**Fonte:** Autora.

**Figura 309** – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - hótima. – Ensaio triaxial PN.



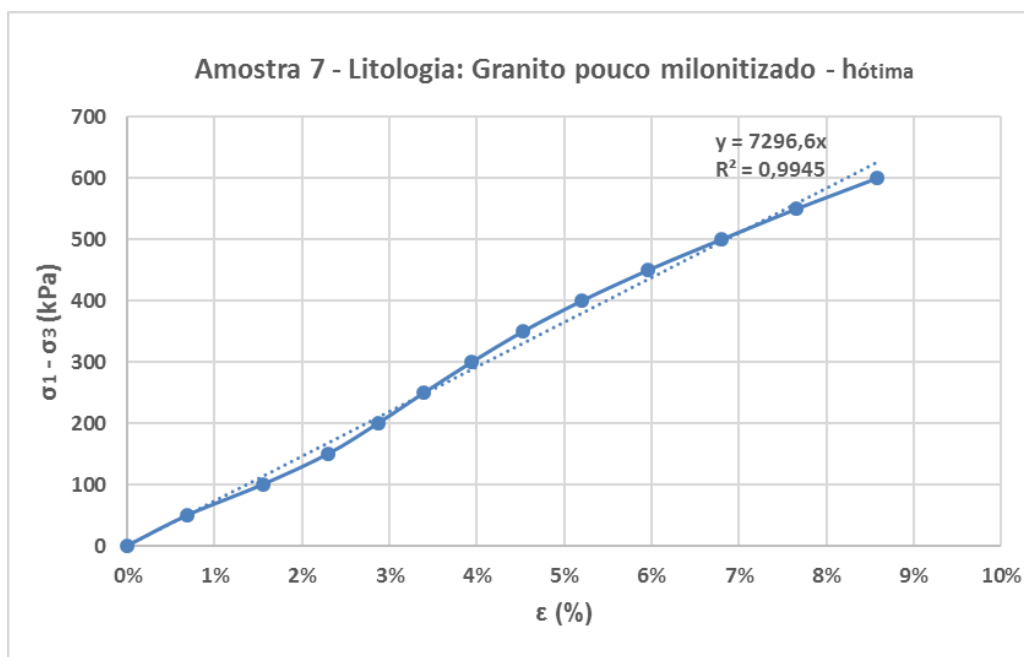
**Fonte:** Autora.

**Figura 310** – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - hótima – Ensaio triaxial PN.



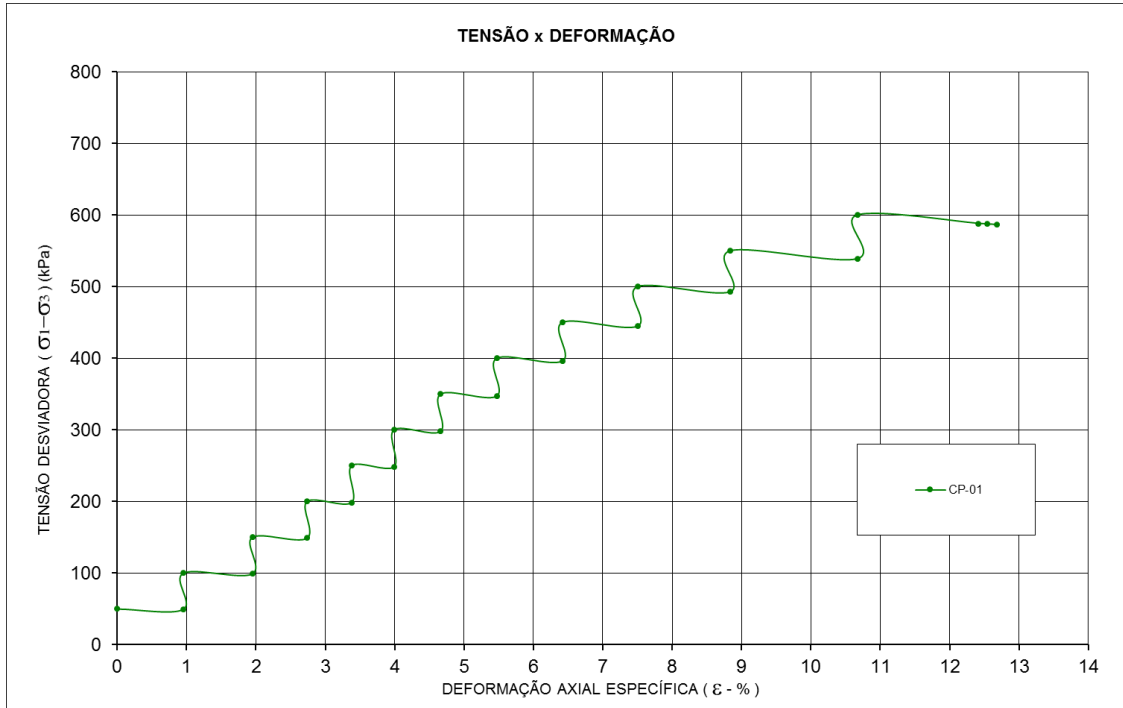
**Fonte:** Autora.

**Figura 311** – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - hótima – Ensaio triaxial PN.



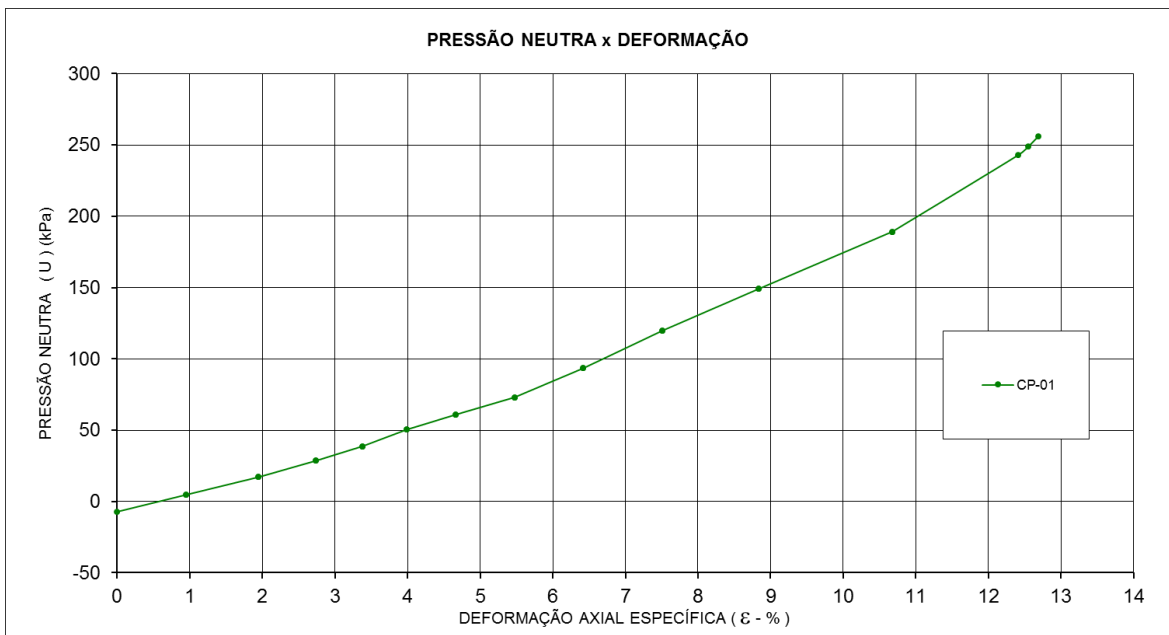
**Fonte:** Autora.

**Figura 312 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - h<sub>ótima</sub> + 2%– Ensaio triaxial PN.**



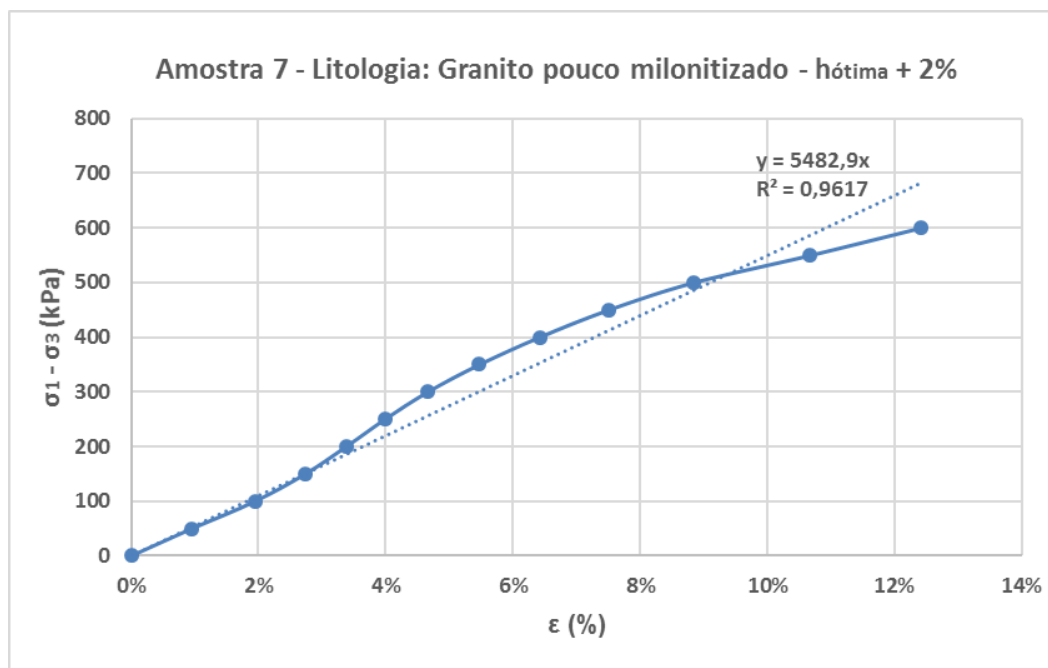
Fonte: Autora.

**Figura 313 – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - h<sub>ótima</sub> + 2%– Ensaio triaxial PN.**



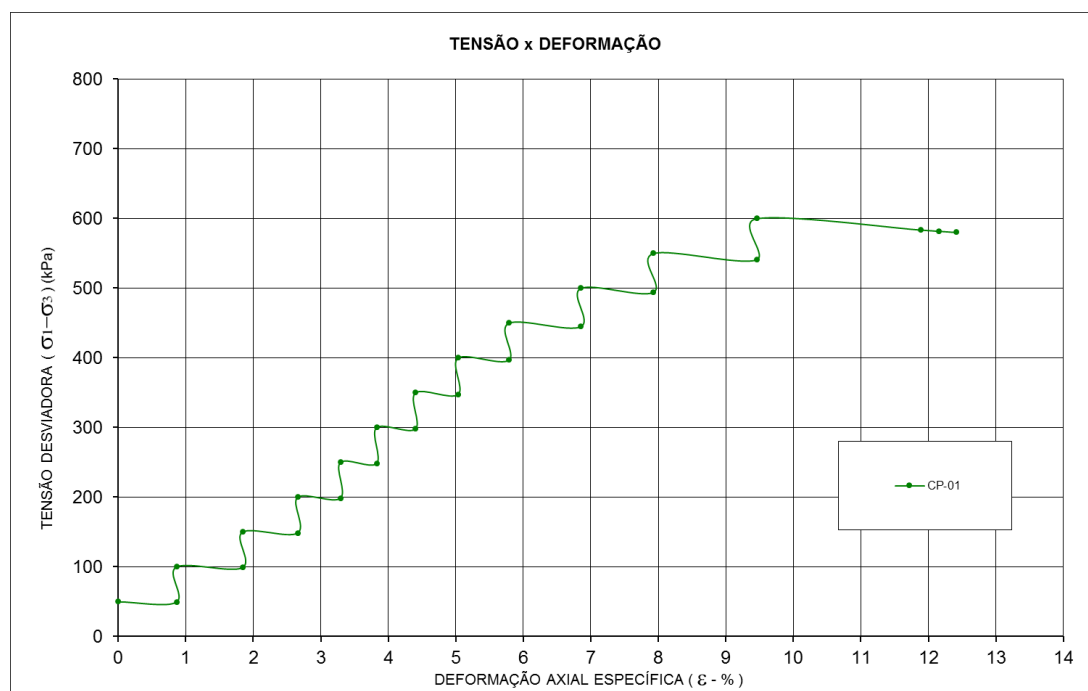
Fonte: Autora.

**Figura 314** – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado -  $\eta_{\text{ótima}} + 2\%$  – Ensaio triaxial PN.



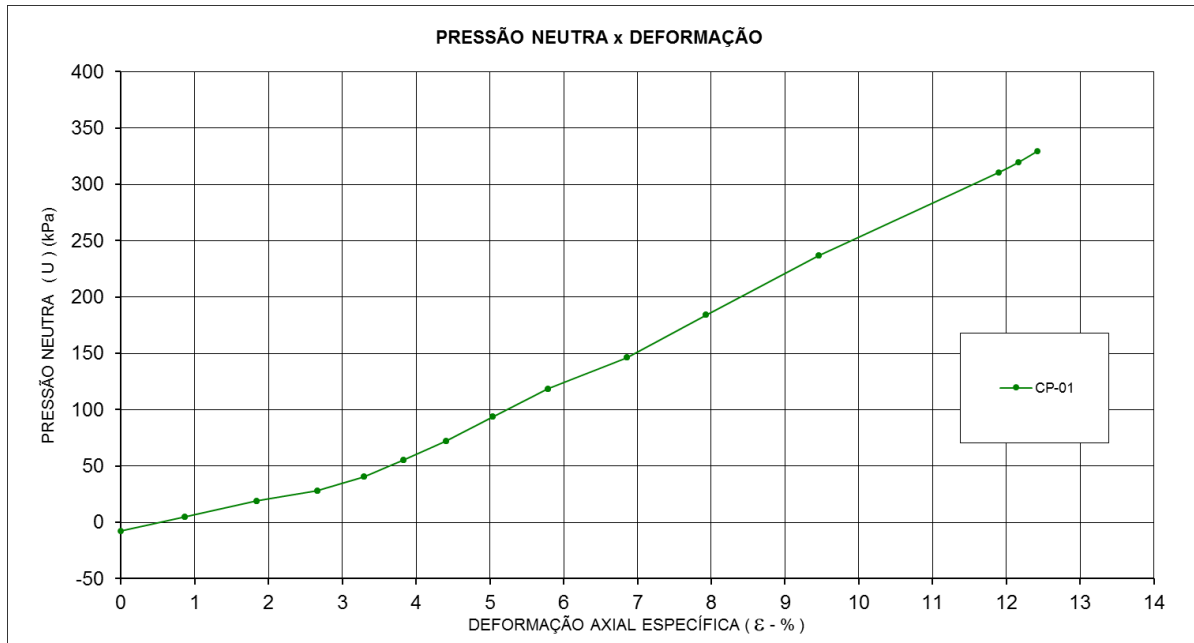
Fonte: Autora.

**Figura 315** – Amostra 7 - Litologia: Granito pouco milonitizado -  $\eta_{\text{ótima}} + 4\%$  – Ensaio triaxial PN.



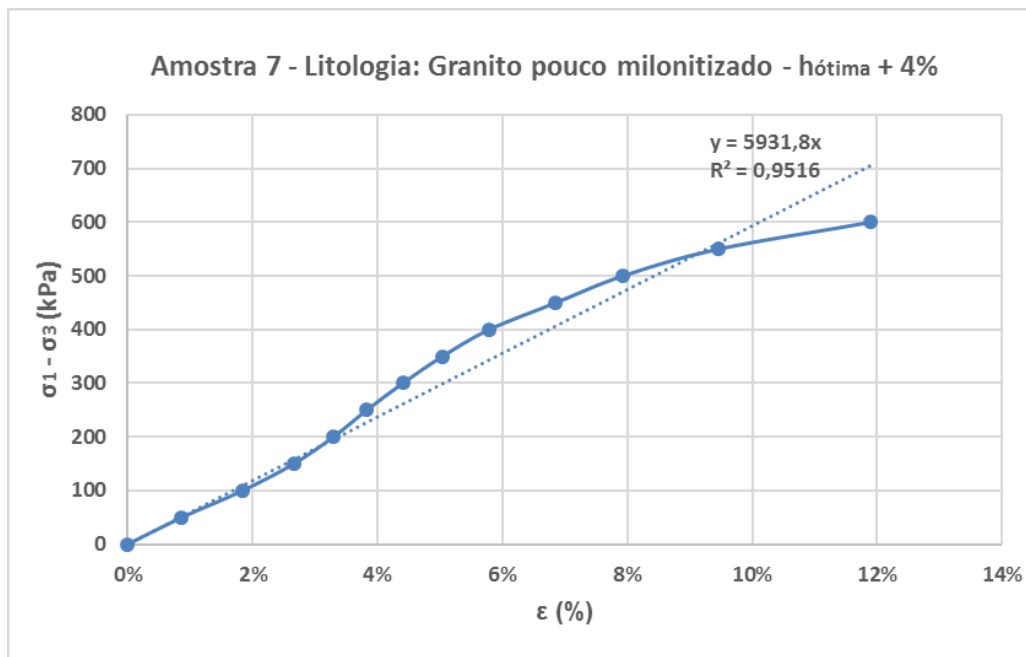
Fonte: Autora.

**Figura 316** – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - hótima + 4%– Ensaio triaxial PN.



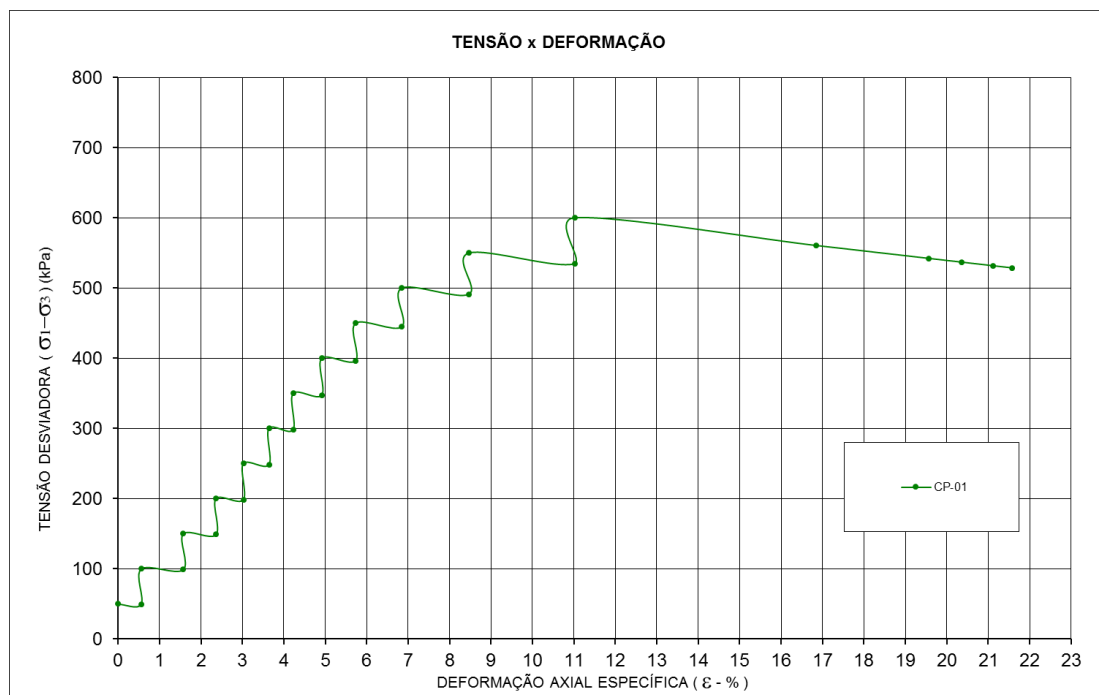
Fonte: Autora.

**Figura 317** – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado - hótima + 4%– Ensaio triaxial PN.



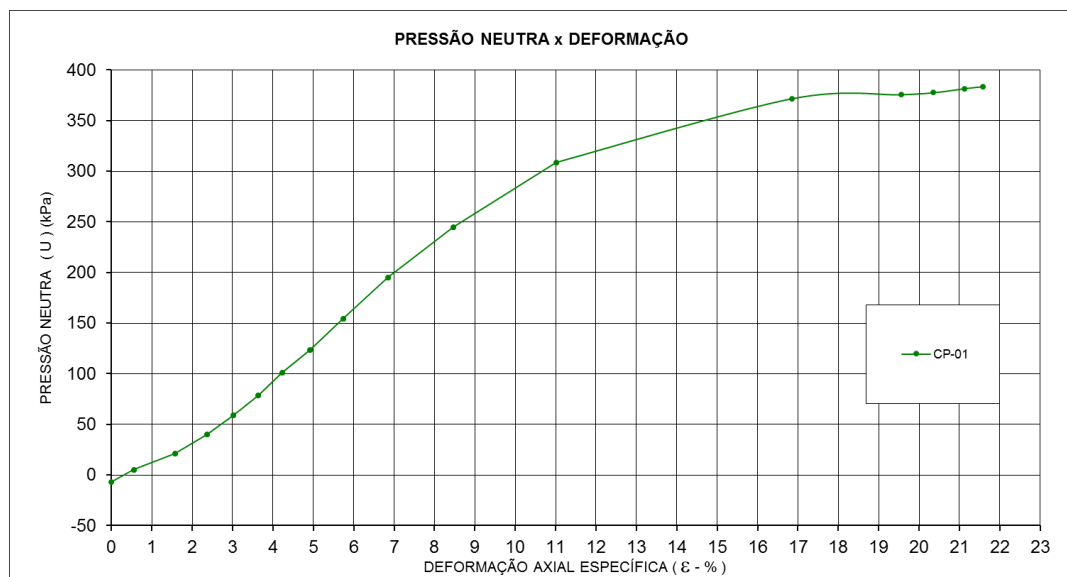
Fonte: Autora.

**Figura 318** – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado -  $h_{\text{ótima}} + 5\%$ . – Ensaio triaxial PN.



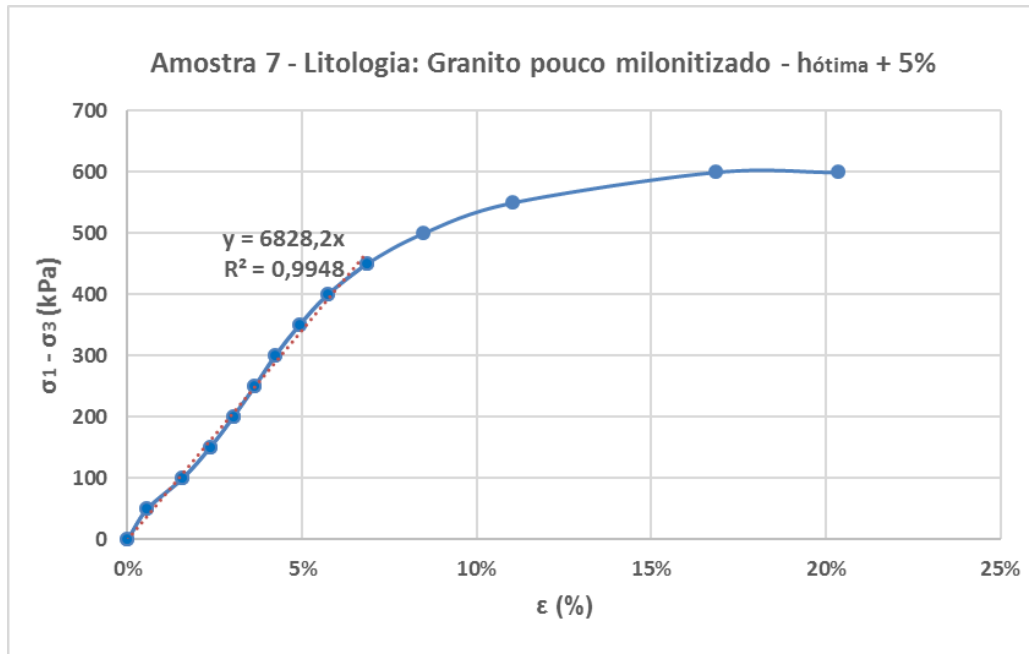
**Fonte:** Autora.

**Figura 319** – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado -  $h_{\text{ótima}} + 5\%$ . – Ensaio triaxial PN.



**Fonte:** Autora.

**Figura 320** – Amostra 7 – Litologia: Granito pouco milonitizado -  $\epsilon_{\text{ótima}} + 5\%$  – Ensaio triaxial PN.

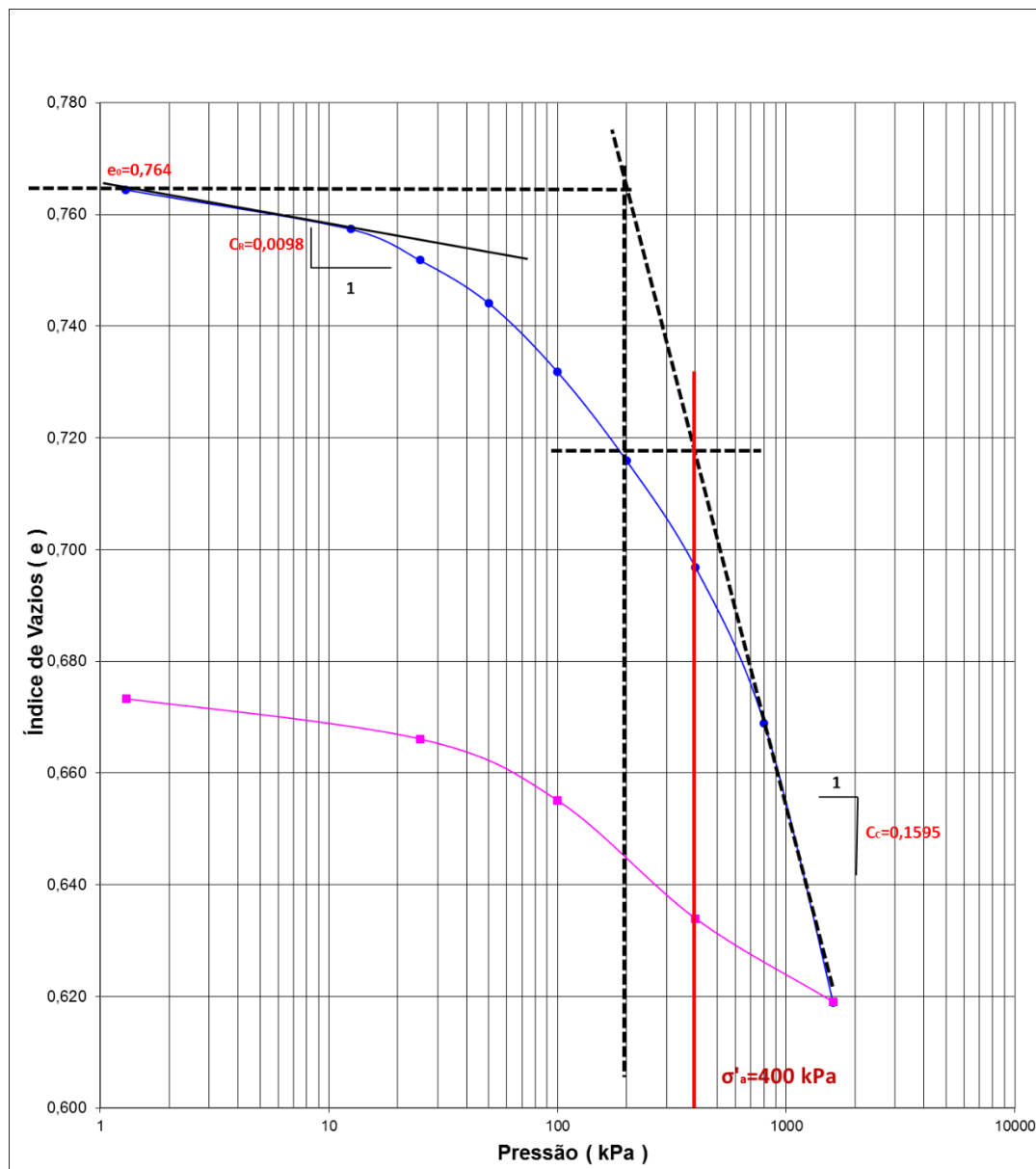


Fonte: Autora.



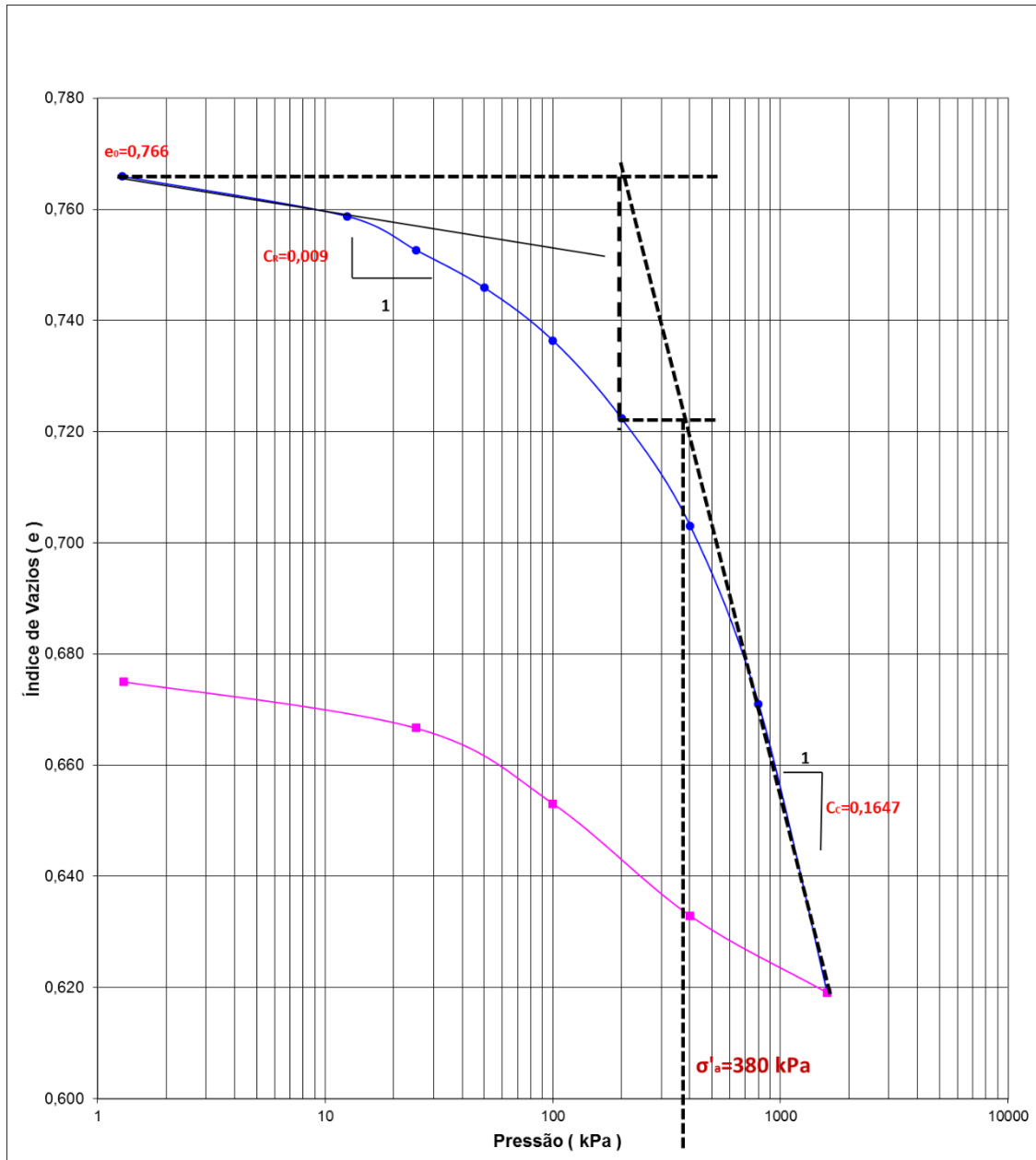
## APÊNDICE F - Ensaio de adensamento edométrico

Figura 321 – Amostra 2 –  $h_{ótima}$  - Litologia: Filito – Ensaio de adensamento edométrico.



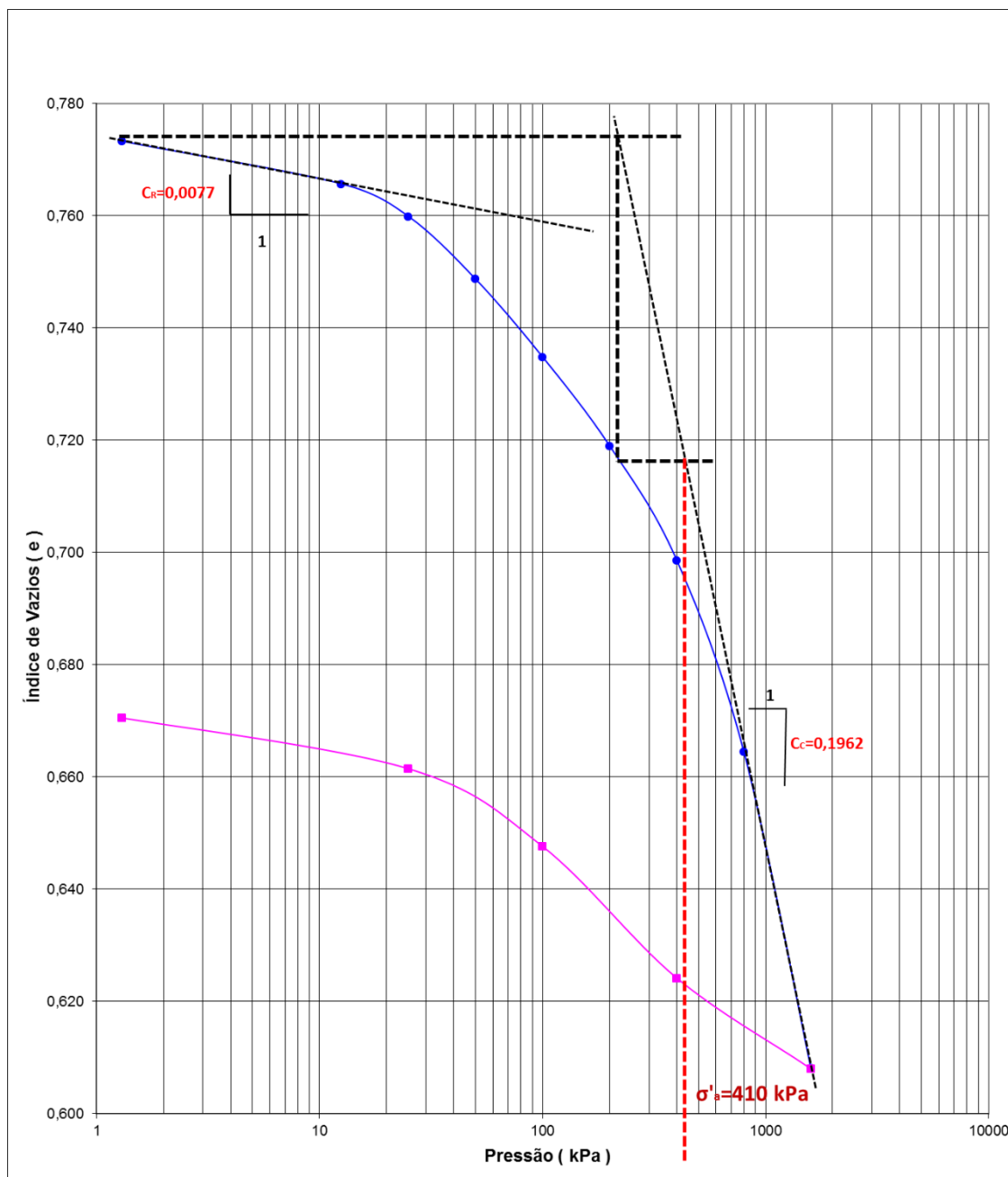
Fonte: Autora.

**Figura 322** – Amostra 2 – h<sub>ótima</sub> + 2% - Litologia: Filito – Ensaio de adensamento edométrico.



Fonte: Autora.

**Figura 323** – Amostra 2 –  $h_{ótima} + 4\%$  - Litologia: Filito – Ensaio de adensamento edométrico.



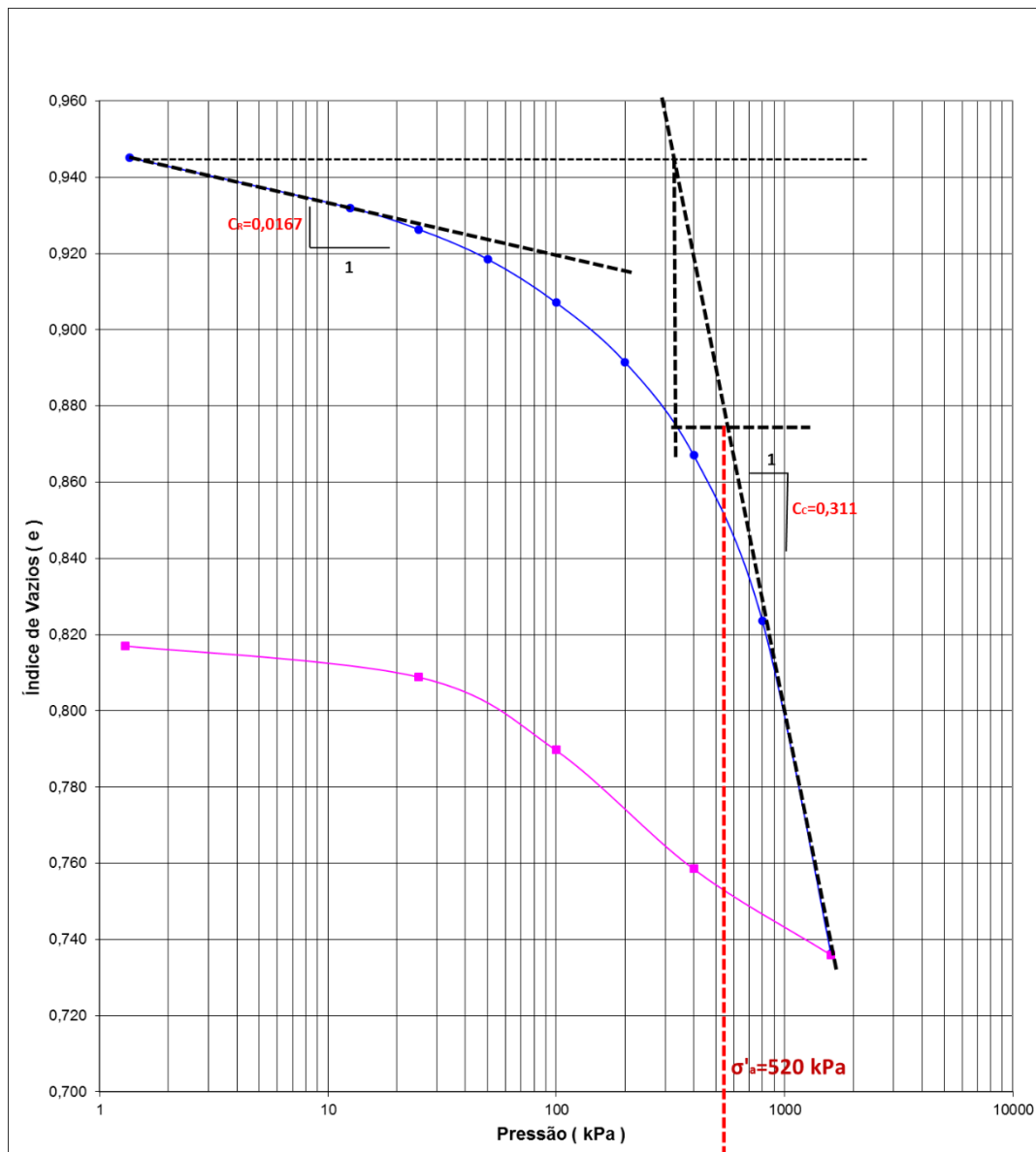
**Fonte:** Autora.

**Tabela 98** – Parâmetros obtidos a partir de ensaios de adensamento com a Amostra 2 (Filito), variando o desvio de umidade em relação à ótima – Ensaio de adensamento edométrico.

hótima			hótima + 2%			hótima + 4%					
e	$\sigma'_v$ (kPa)	av	M (kPa)	e	$\sigma'_v$ (kPa)	av	M (kPa)	e	$\sigma'_v$ (kPa)	av	M (kPa)
0,764	1,30	5,30E-04	3,329,21	0,766	1,29	5,58E-04	3,165,67	0,773	1,29	5,63E-04	3,150,35
0,757	13	3,47E-04	5,086,00	0,759	13	3,32E-04	5,319,48	0,766	13	4,51E-04	3,933,49
0,752	25	2,64E-04	6,683,55	0,753	25	2,13E-04	8,277,03	0,760	25	3,26E-04	5,440,99
0,744	50	1,84E-04	9,613,23	0,746	50	1,54E-04	11,448,60	0,749	50	1,93E-04	9,205,58
0,732	100	1,13E-04	15,555,56	0,736	100	1,09E-04	16,209,83	0,735	100	1,18E-04	15,037,26
0,716	200	7,72E-05	22,866,67	0,722	200	8,49E-05	20,806,79	0,719	200	8,99E-05	19,718,31
0,697	400	6,46E-05	27,319,79	0,703	400	6,93E-05	25,478,18	0,699	400	7,48E-05	23,720,61
0,669	800	6,25E-05	28,242,07	0,671	800	6,50E-05	27,184,47	0,665	800	7,06E-05	25,128,21
0,619	1.600			0,619	1.600			0,608	1.600		

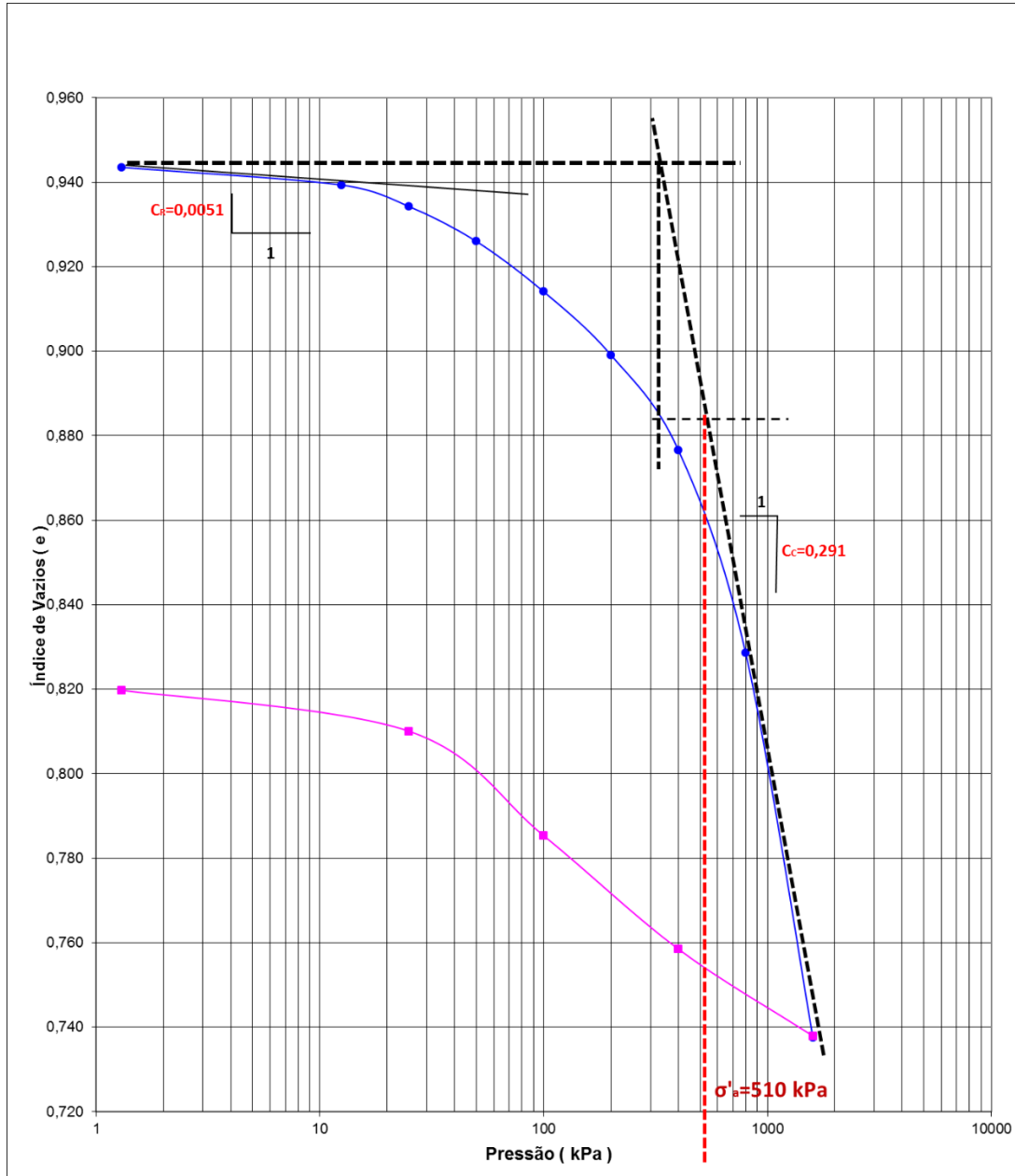
Fonte: Autora.

**Figura 324** – Amostra 4 – hótima - Litologia: Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico.



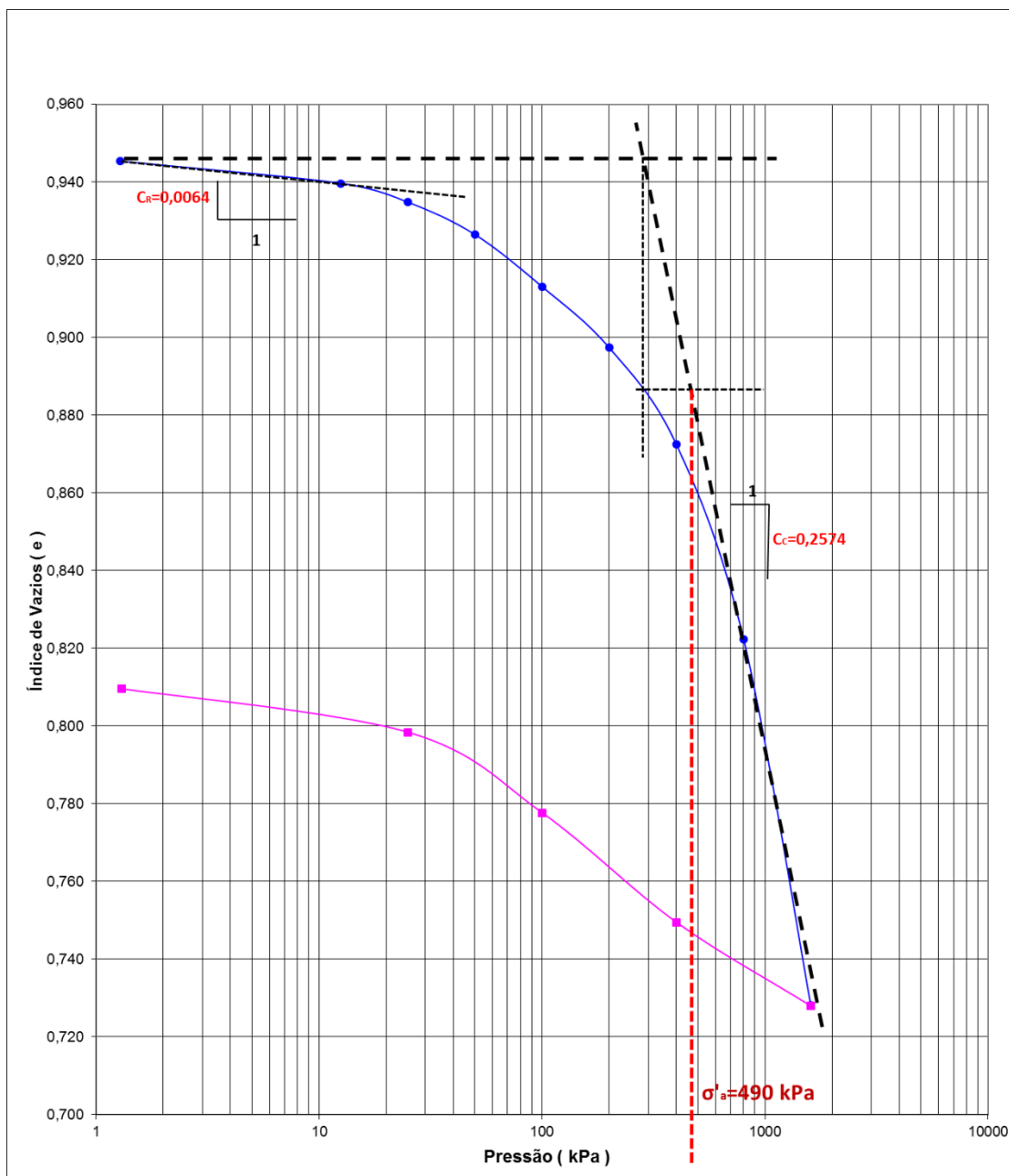
Fonte: Autora.

**Figura 325 – Amostra 4 – h<sub>ótima</sub> + 2% - Litologia: Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico.**



Fonte: Autora.

**Figura 326** – Amostra 4 – h<sub>ótima</sub> + 4% - Litologia: Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico.



Fonte: Autora.

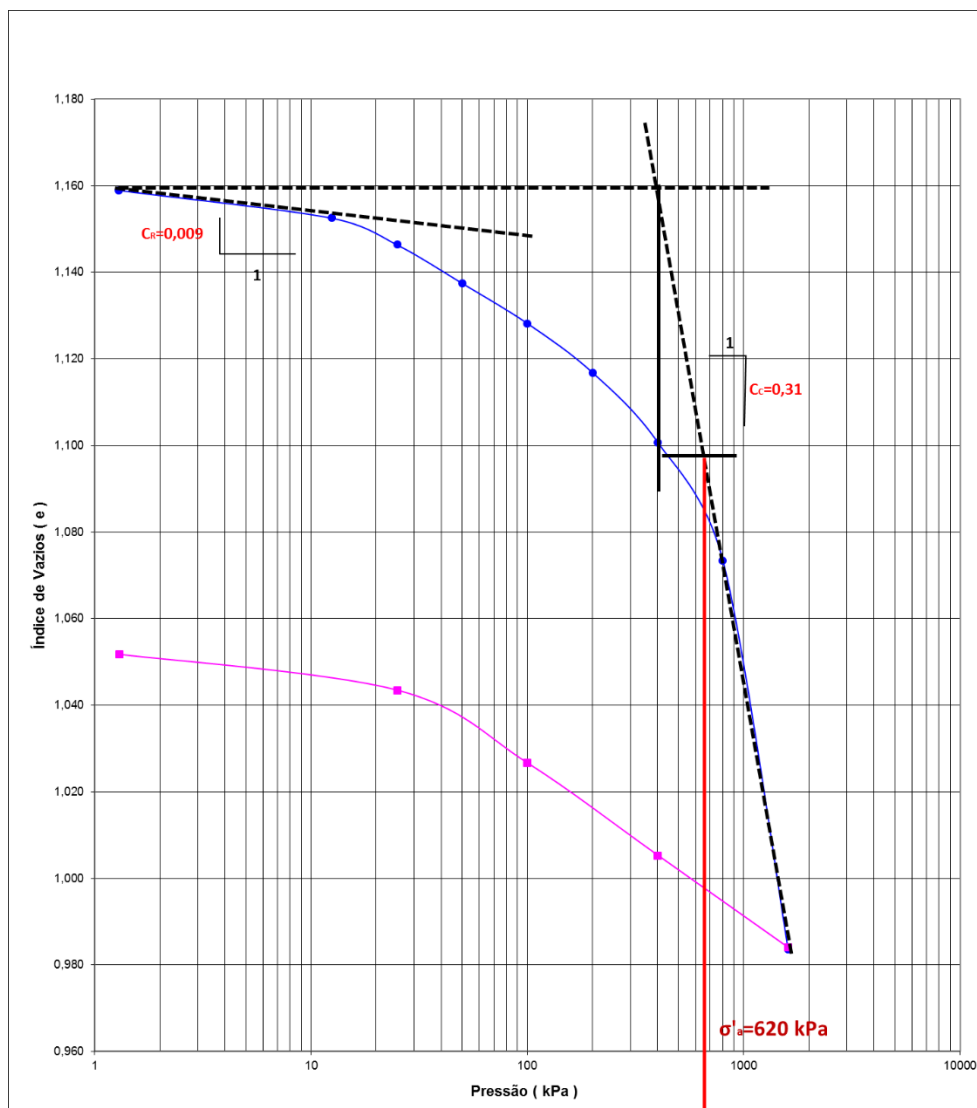
**Tabela 99** – Parâmetros obtidos a partir de ensaios de adensamento com a Amostra 4 (Ultramilonito), variando o desvio de umidade em relação à ótima – Ensaio de adensamento edométrico.

hótima			hótima + 2%			hótima + 4%								
e	$\sigma'v$ (kPa)	av	mv	M (kPa)	e	$\sigma'v$ (kPa)	av	mv	M (kPa)	e	$\sigma'v$ (kPa)	av	mv	M (kPa)
0,945	1,35	7,89E-04	4,06E-04	2,464	0,945	1,29	4,44E-04	2,28E-04	4,379	0,944	1,30	3,92E-04	2,02E-04	4,960
0,932	12,5	3,52E-04	1,81E-04	5,524	0,940	12,5	3,49E-04	1,79E-04	5,575	0,939	12,5	3,52E-04	1,81E-04	5,525
0,926	25	2,52E-04	1,30E-04	7,709	0,935	25	2,87E-04	1,48E-04	6,779	0,934	25	2,64E-04	1,36E-04	7,354
0,919	50	1,77E-04	9,07E-05	11,020	0,926	50	1,89E-04	9,71E-05	10,294	0,926	50	1,75E-04	9,01E-05	11,100
0,907	100	1,32E-04	6,77E-05	14,768	0,913	100	1,34E-04	6,89E-05	14,522	0,914	100	1,23E-04	6,33E-05	15,799
0,892	200	1,12E-04	5,78E-05	17,301	0,897	200	1,25E-04	6,42E-05	15,570	0,899	200	1,18E-04	6,06E-05	16,502
0,867	400	1,09E-04	5,60E-05	17,841	0,872	400	1,20E-04	6,16E-05	16,237	0,877	400	1,16E-04	5,95E-05	16,814
0,824	800	1,09E-04	5,62E-05	17,809	0,822	800	1,18E-04	6,05E-05	16,526	0,829	800	1,14E-04	5,86E-05	17,073
0,736	1600				0,728	1600				0,738	1600			

Fonte: Autora.

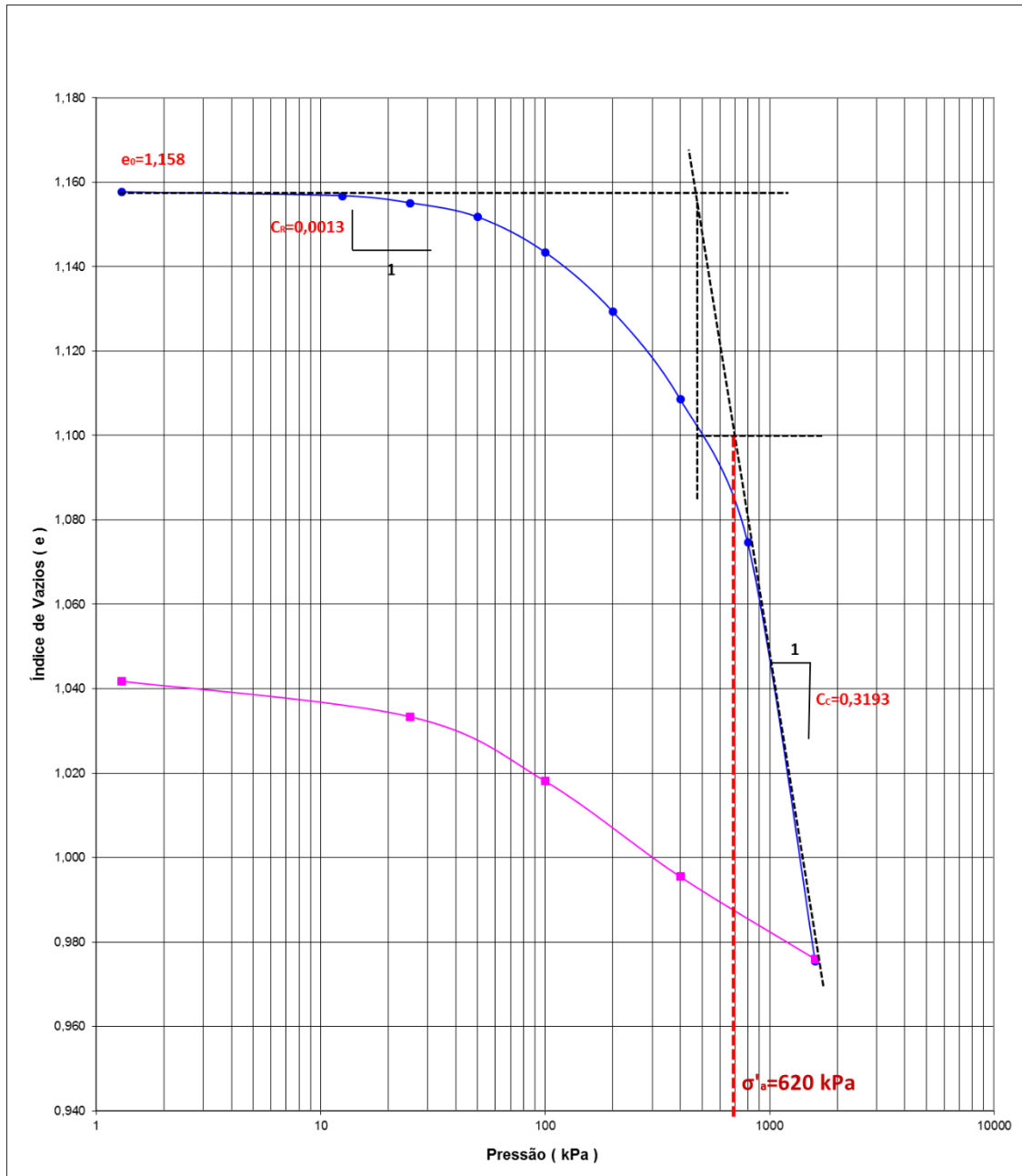


**Figura 327** – Amostra 5 –  $h_{ótima}$  - Litologia: Metabásica – Ensaio de adensamento edométrico.



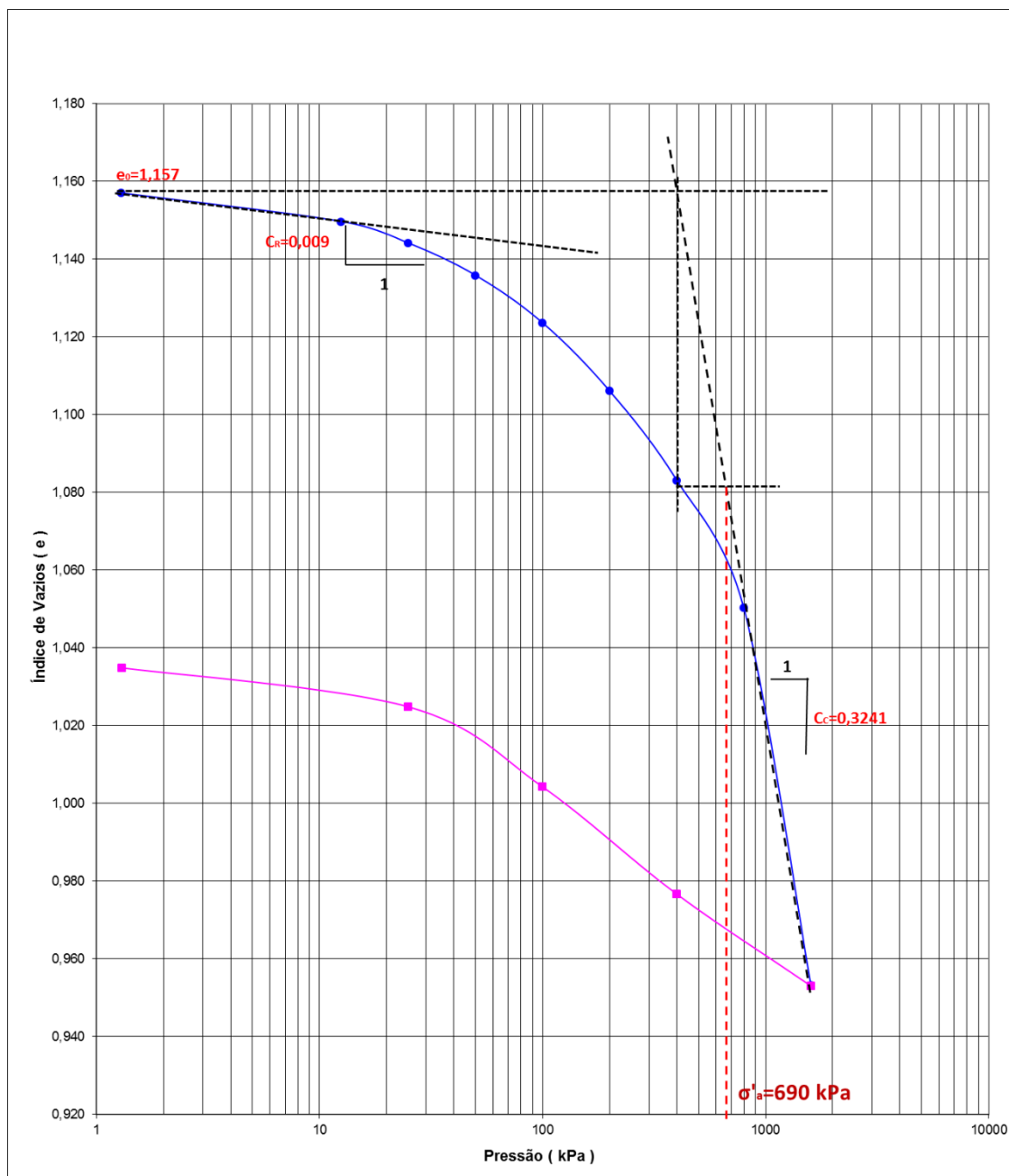
**Fonte:** Autora.

**Figura 328** – Amostra 5– h<sub>ótima</sub> + 2% - Litologia: Metabásica – Ensaio de adensamento edométrico.



Fonte: Autora.

**Figura 329** – Amostra 5 – hótima + 4% - Litologia: Metabásica – Ensaio de adensamento edométrico.



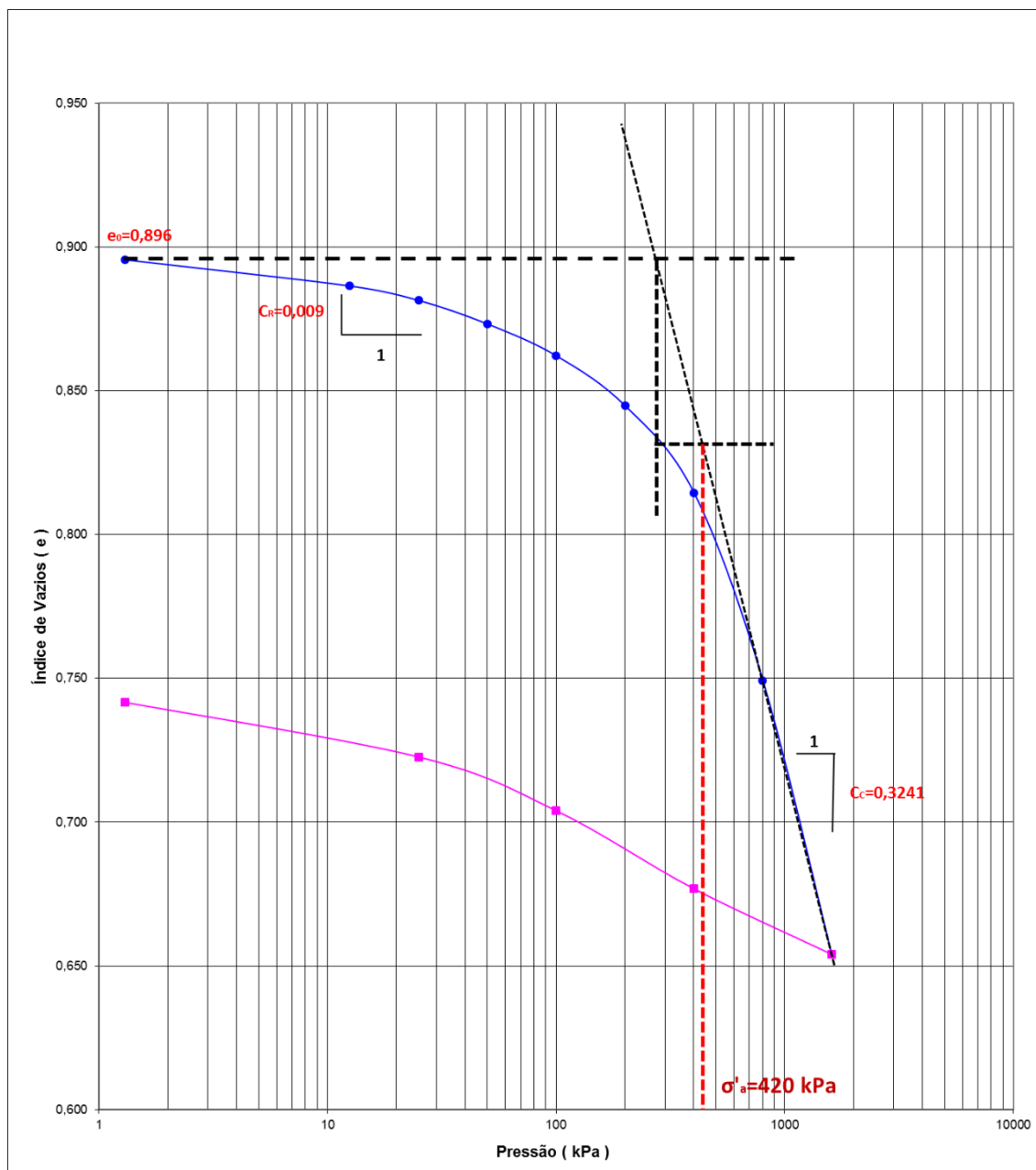
Fonte: Autora.

**Tabela 100** – Parâmetros obtidos a partir de ensaios de adensamento com a Amostra 5 (Metabásica), variando o desvio de umidade em relação à ótima – Ensaio de adensamento edométrico.

hótima			hótima + 2%			hótima + 4%		
e	$\sigma'_{v}$ (kPa)	M (kPa)	e	$\sigma'_{v}$ (kPa)	M (kPa)	e	$\sigma'_{v}$ (kPa)	M (kPa)
1,159	1,294	4,067	1,158	1,298	17,400	1,157	1,291	3,992
	5,31E-04	2,46E-04		1,24E-04	5,75E-05		5,40E-04	2,50E-04
1,153	12,5	5,462	1,157	12,5	14,043	1,150	12,5	5,938
	3,95E-04	1,83E-04		1,54E-04	7,12E-05		3,63E-04	1,68E-04
1,146	25	9,230	1,155	25	14,580	1,144	25	8,007
	2,34E-04	1,08E-04		1,48E-04	6,86E-05		2,69E-04	1,25E-04
1,137	50	16,103	1,152	50	17,789	1,136	50	11,057
	1,34E-04	6,21E-05		1,21E-04	5,62E-05		1,95E-04	9,04E-05
1,128	100	23,969	1,143	100	22,465	1,124	100	16,326
	9,01E-05	4,17E-05		9,60E-05	4,45E-05		1,32E-04	6,13E-05
1,117	200	30,061	1,129	200	19,656	1,106	200	23,582
	7,18E-05	3,33E-05		1,10E-04	5,09E-05		9,15E-05	4,24E-05
1,101	400	21,657	1,109	400	19,135	1,083	400	19,580
	9,97E-05	4,62E-05		1,13E-04	5,23E-05		1,10E-04	5,11E-05
1,073	800	19,235	1,075	800	17,407	1,050	800	17,770
	1,12E-04	5,20E-05		1,24E-04	5,74E-05		1,21E-04	5,63E-05
0,984	1600		0,976	1600		0,953	1600	

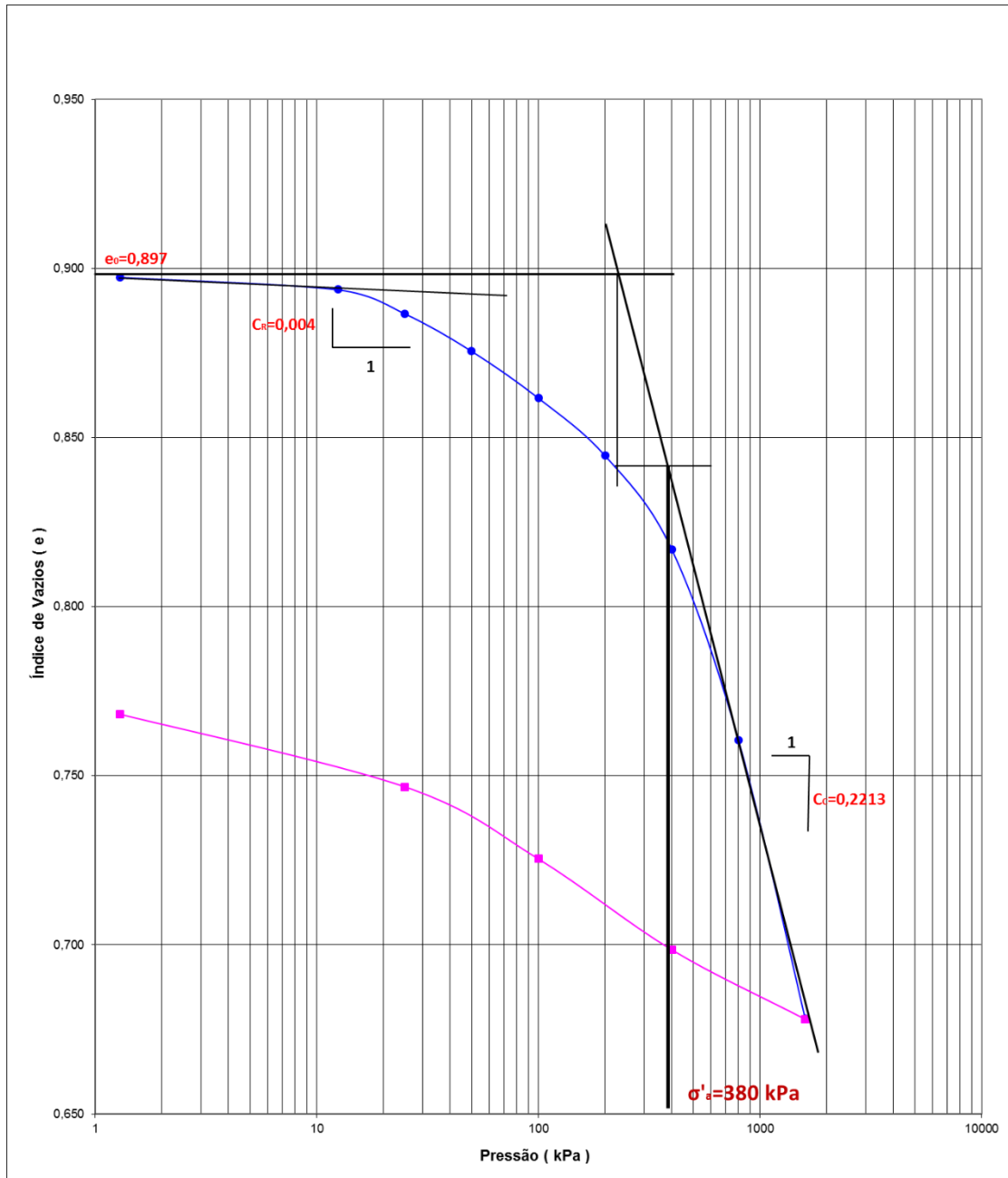
Fonte: Autora.

**Figura 330** – Amostra 6 – hótima - Litologia: Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico.



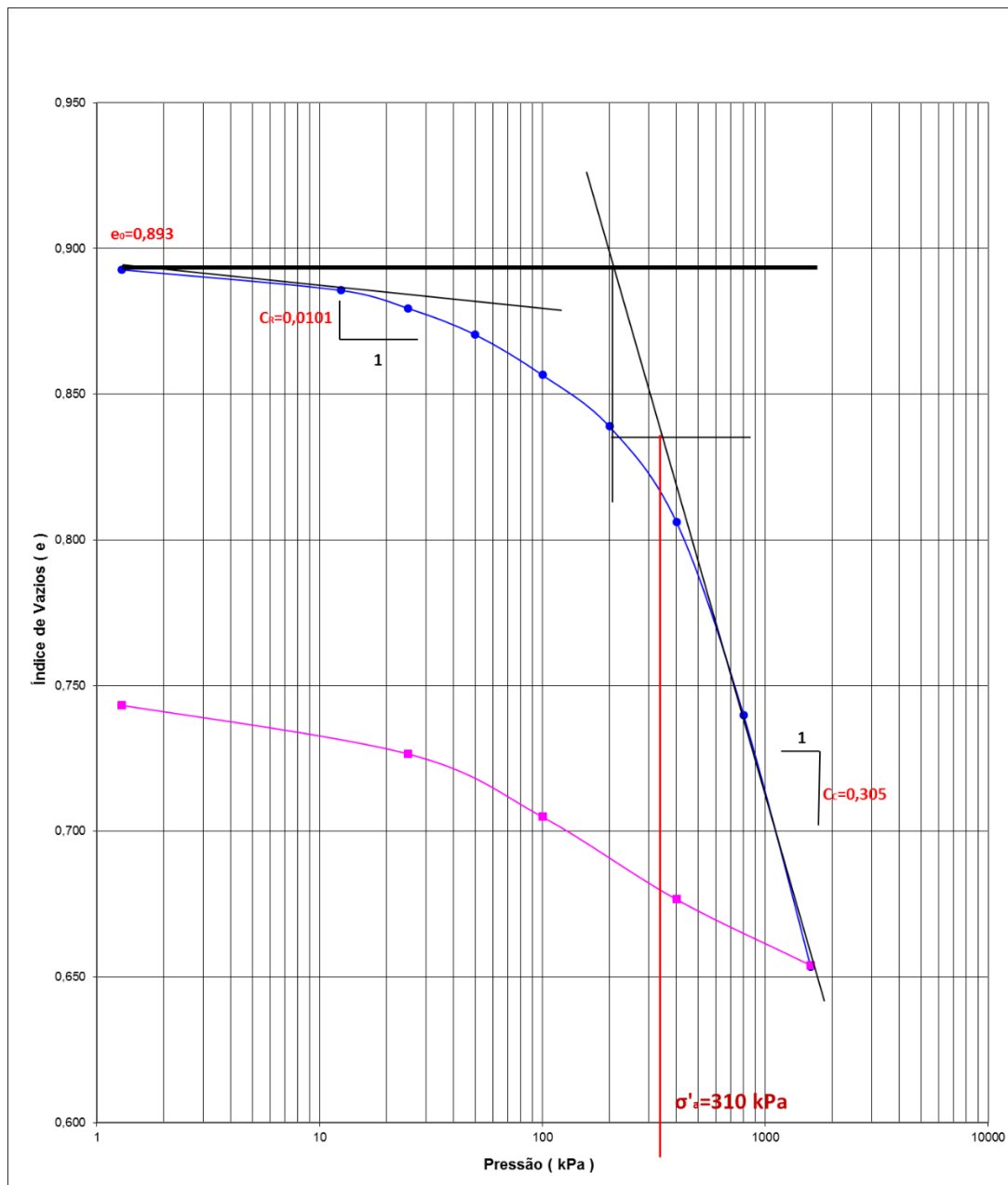
Fonte: Autora.

**Figura 331** – Amostra 6 – hótima + 2% - Litologia: Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico.



Fonte: Autora.

**Figura 332** – Amostra 6 – h<sub>ótima</sub> + 4% - Litologia: Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico.



Fonte: Autora.

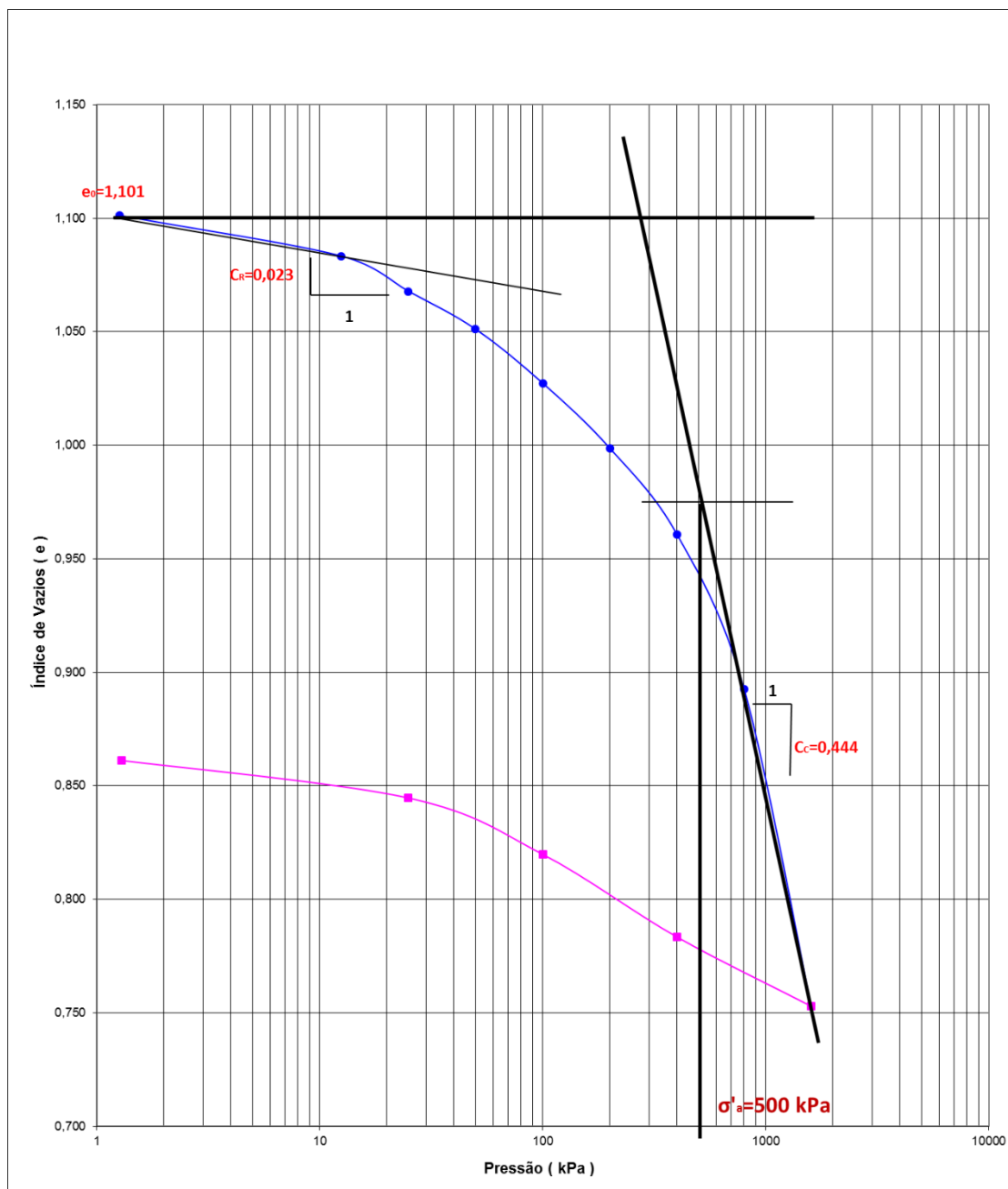
**Tabela 101** – Parâmetros obtidos a partir de ensaios de adensamento com a Amostra 6 (Ultramilonito), variando o desvio de umidade em relação à ótima – Ensaio de adensamento edométrico.

e	hótima			hótima + 2%			hótima + 4%				
	$\sigma'v$ (kPa)	av	M (kPa)	e	$\sigma'v$ (kPa)	av	M (kPa)	e	$\sigma'v$ (kPa)	av	M (kPa)
0,896	1,298	5,94E-04	3,193,33	0,897	1,291	4,59E-04	4,129,65	0,893	1,297	5,59E-04	3,383,99
0,887	12,5	3,49E-04	5,427,22	0,894	12,5	4,79E-04	3,958,91	0,886	13	4,00E-04	4,737,57
0,882	25	2,52E-04	7,528,53	0,887	25	3,25E-04	5,845,26	0,879	25	3,01E-04	6,291,27
0,873	50	1,88E-04	10,106,07	0,876	50	2,01E-04	9,443,83	0,870	50	2,05E-04	9,215,48
0,862	100	1,58E-04	12,014,01	0,862	100	1,48E-04	12,846,44	0,857	100	1,68E-04	11,279,18
0,845	200	1,60E-04	11,860,30	0,845	200	1,40E-04	13,511,92	0,839	200	1,65E-04	11,461,99
0,815	400	1,32E-04	14,387,58	0,817	400	1,14E-04	16,668,69	0,806	400	1,24E-04	15,222,46
0,749	800	1,19E-04	15,909,09	0,760	800	1,03E-04	18,438,38	0,740	800	1,08E-04	17,547,00
0,654	1600			0,678	1600			0,654	1,600		

Fonte: Autora.

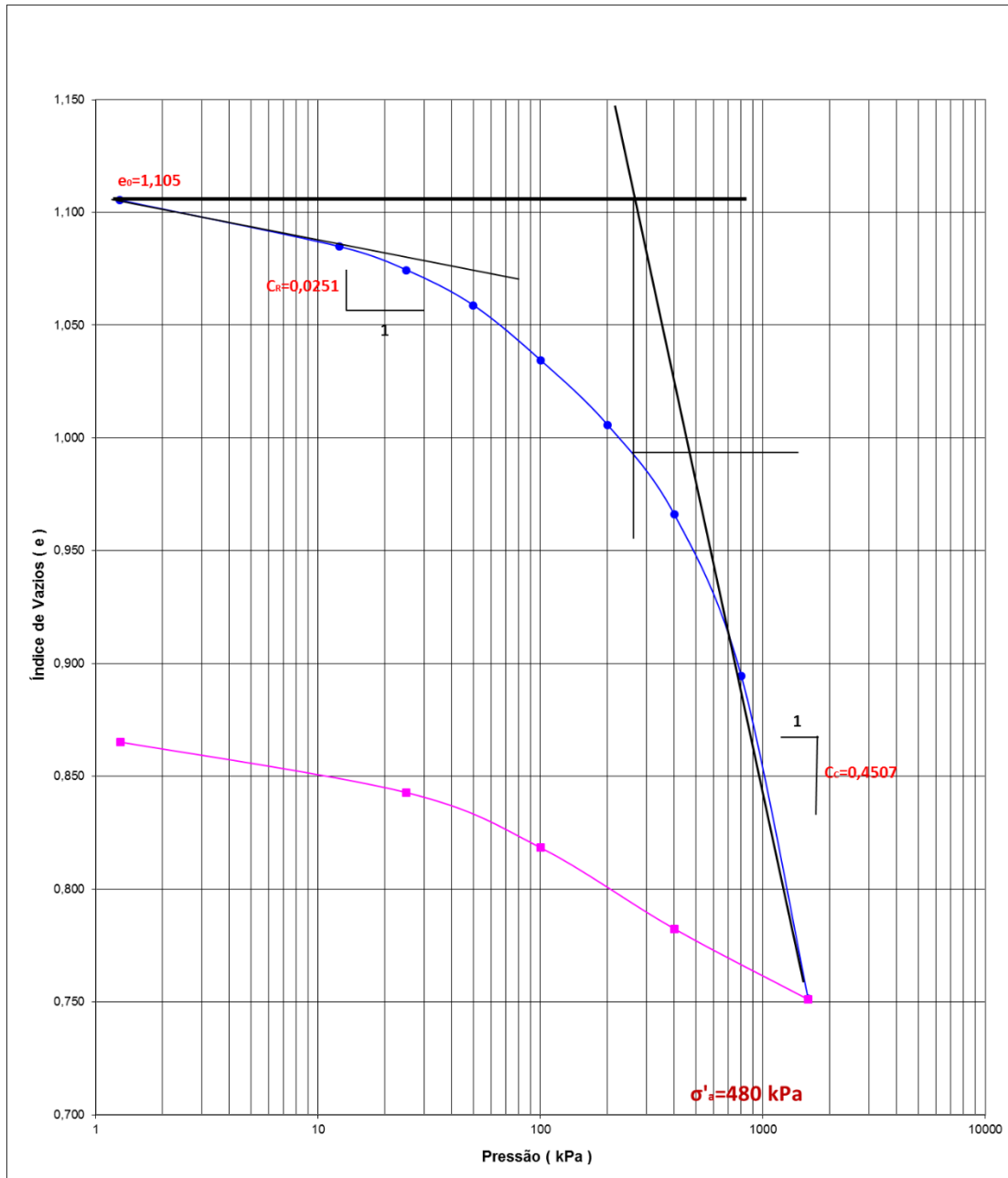


**Figura 333** – Amostra 7 – h<sub>ótima</sub> - Litologia: Granito pouco milonitizado –  
Ensaio de adensamento edométrico.



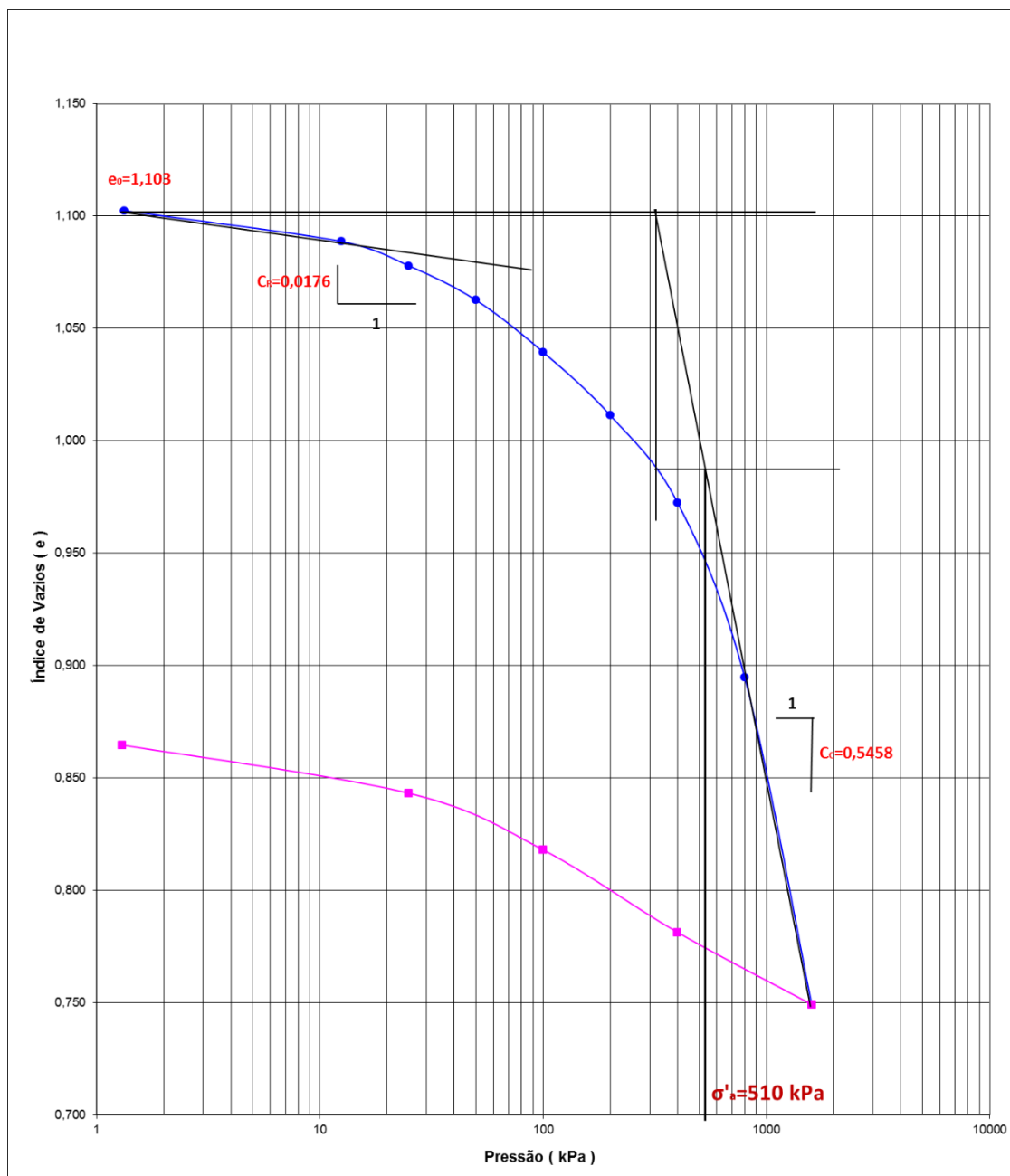
Fonte: Autora.

**Figura 334** – Amostra 7 –  $h_{ótima} + 2\%$  - Litologia: Granito pouco milonitizado – Ensaio de adensamento edométrico.



Fonte: Autora.

**Figura 335** – Amostra 7 –  $h_{ótima} + 4\%$  - Litologia: Granito pouco milonitizado – Ensaio de adensamento edométrico.



Fonte: Autora.

**Tabela 102** – Parâmetros obtidos a partir de ensaios de adensamento com a Amostra 7 (Granito pouco milonitizado), variando o desvio de umidade em relação à ótima – Ensaio de adensamento edométrico.

hótima						hótima + 2%						hótima + 4%																												
e	$\sigma'v$ (kPa)	av	mv	M (kPa)	e	$\sigma'v$ (kPa)	av	mv	M (kPa)	e	$\sigma'v$ (kPa)	av	mv	M (kPa)	e	$\sigma'v$ (kPa)	av	mv	M (kPa)																					
1,101	1,27	1,40E-03	6,68E-04	1,496,58	1,105	1,28	1,30E-03	6,16E-04	1,623,33	1,103	1,32	1,03E-03	4,92E-04	2,034,58	1,083	12,5	8,31E-04	3,95E-04	2,528,52	1,085	12,5	6,84E-04	3,25E-04	3,077,81	1,068	25	5,31E-04	2,52E-04	3,960,69	1,074	25	5,25E-04	2,50E-04	4,007,79	1,078	25	5,05E-04	2,40E-04	4,162,52	
1,051	50	3,40E-04	1,62E-04	6,171,69	1,059	50	3,43E-04	1,63E-04	6,133,03	1,063	50	3,33E-04	1,59E-04	6,306,60	1,027	100	2,17E-04	1,03E-04	9,669,21	1,035	100	2,24E-04	1,06E-04	9,398,95	0,999	200	1,76E-04	8,37E-05	11,949,69	1,006	200	1,85E-04	8,77E-05	11,405,42	1,011	200	1,94E-04	9,23E-05	10,830,30	
0,961	400	1,73E-04	8,25E-05	12,119,83	0,966	400	1,79E-04	8,50E-05	11,765,48	0,973	400	1,86E-04	8,83E-05	11,319,72	0,893	800	1,75E-04	8,31E-05	12,034,84	0,895	800	1,79E-04	8,50E-05	11,762,89	0,753	1600	0,751	1600	0,749	1600	0,749	1600	0,749	1600	0,749	1600	0,749	1600	0,749	1600

Fonte: Autora.

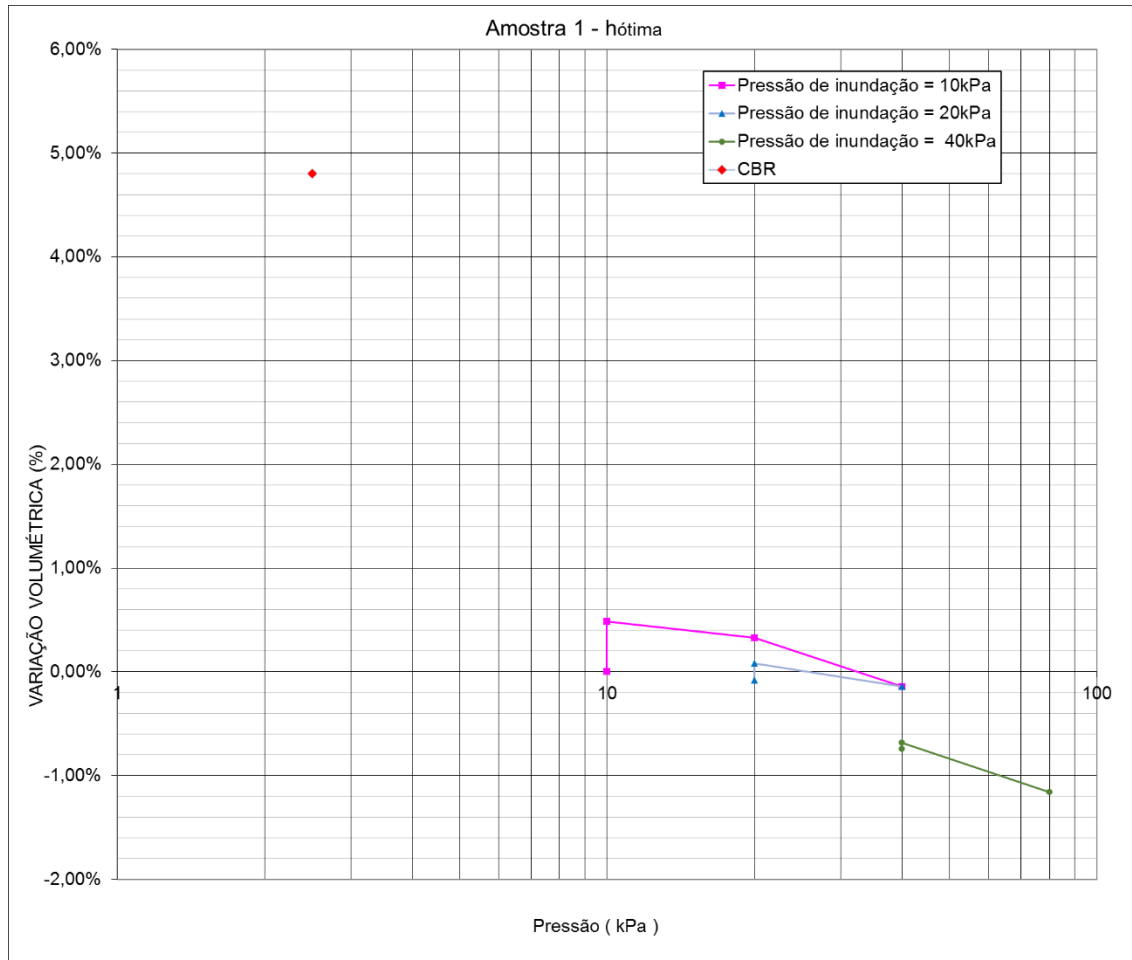
## APÊNDICE G - Ensaios de adensamento edométrico para obter pressão de expansão

Tabela 103 – Resumo dos ensaios.

Amostra	Litologia	Pressão de inundação (kPa)	h (%)			$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )			Grau de saturação (%)		
			hot - 3%	hot	hot + 3%	hot - 3%	hot	hot + 3%	hot - 3%	hot	hot + 3%
1	Filito/Metabásica	10	13,4	16,4	-	15,6	15,6	-	50,1	61,4	-
		20	13,3	16,4	-	15,6	15,6	-	50,1	61,4	-
		40	13,3	16,3	-	15,6	15,6	-	50,0	61,3	-
2	Filito	2,6	-	18,1	-	-	15,9	-	-	65,9	-
		10	14,8	18,1	21,3	15,9	15,9	15,9	54,4	66,0	77,4
		20	14,8	18,2	21,2	15,9	15,9	15,9	54,4	66,2	77,1
		40	14,9	18,1	21,4	15,9	15,9	15,9	54,4	66,1	77,5
3	Filito	2,6	-	18,9	-	-	15,8	-	-	69,3	-
		10	15,4	18,6	21,7	15,9	15,9	15,9	54,4	68,7	77,4
		20	15,4	18,6	21,6	15,9	15,9	15,9	54,4	68,7	77,1
		40	15,4	18,8	21,5	15,9	15,8	15,9	54,4	69,0	77,5
4	Ultramilonito	10	16,3	-	-	14,6	-	-	48,6	-	-
		20	16,2	-	-	14,6	-	-	48,4	-	-
		40	16,2	-	-	14,6	-	-	48,5	-	-
6	Ultramilonito	2,6	-	23,4	-	-	14,8	-	-	72,5	-
		10	19,9	23,0	26,2	14,9	14,8	14,8	63,1	72,5	79,0
		20	19,9	22,8	26,2	14,9	14,9	14,8	63,1	72,3	79,3
		40	20,1	22,9	26,1	14,9	14,9	14,8	63,5	72,5	79,4
7	Granito pouco milonitizado	2,6	-	28,5	-	-	13,1	-	-	71,2	-
		10	25,5	28,5	31,8	13,0	13,0	13,0	63,2	70,6	79,0
		20	25,5	28,4	31,0	13,0	13,0	13,0	63,1	70,5	79,3
		40	25,4	28,4	32,1	13,0	13,0	13,0	63,3	70,4	79,4

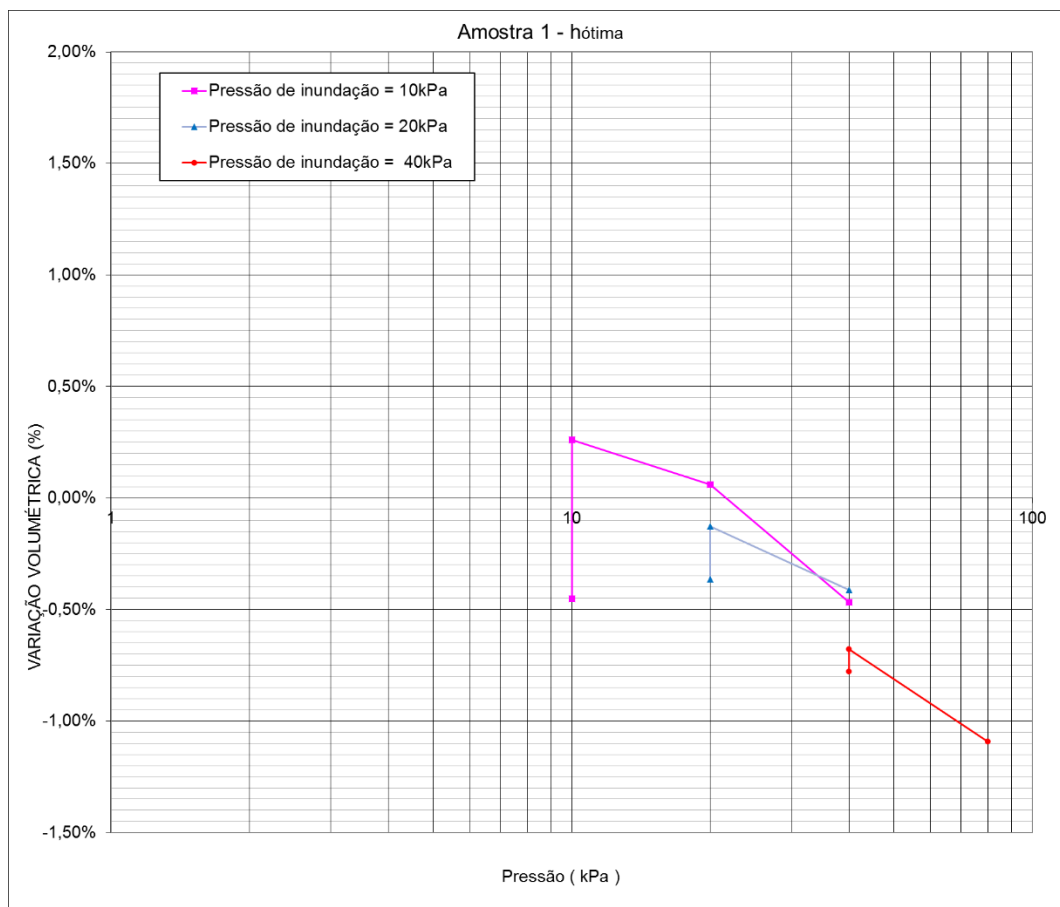
Fonte: Autora.

**Figura 336** – Amostra 1 – hótima – Filito/ Metabásica – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão.



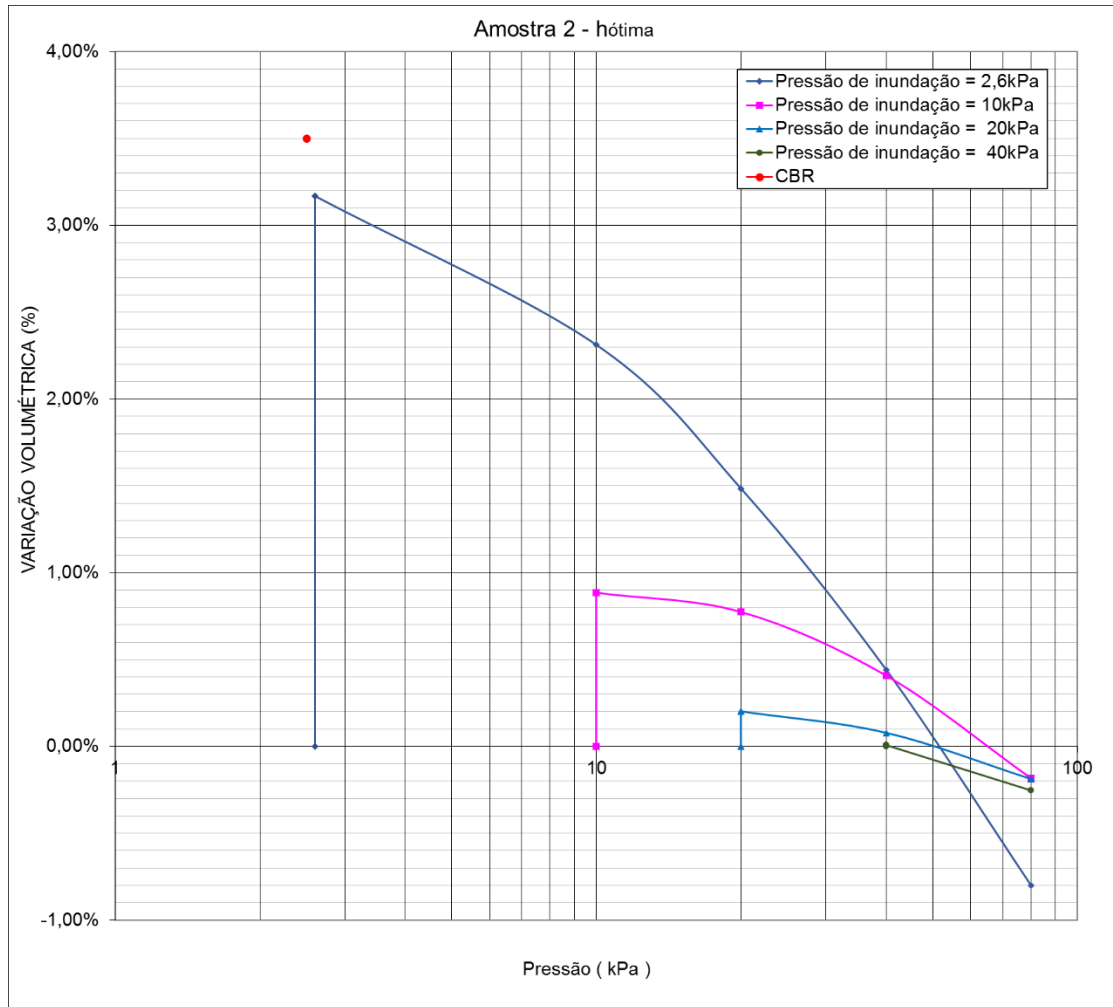
Fonte: Autora.

**Figura 337** – Amostra 1 –  $h_{ótima} + 3\%$  – Filito/ Metabásica – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão.



Fonte: Autora.

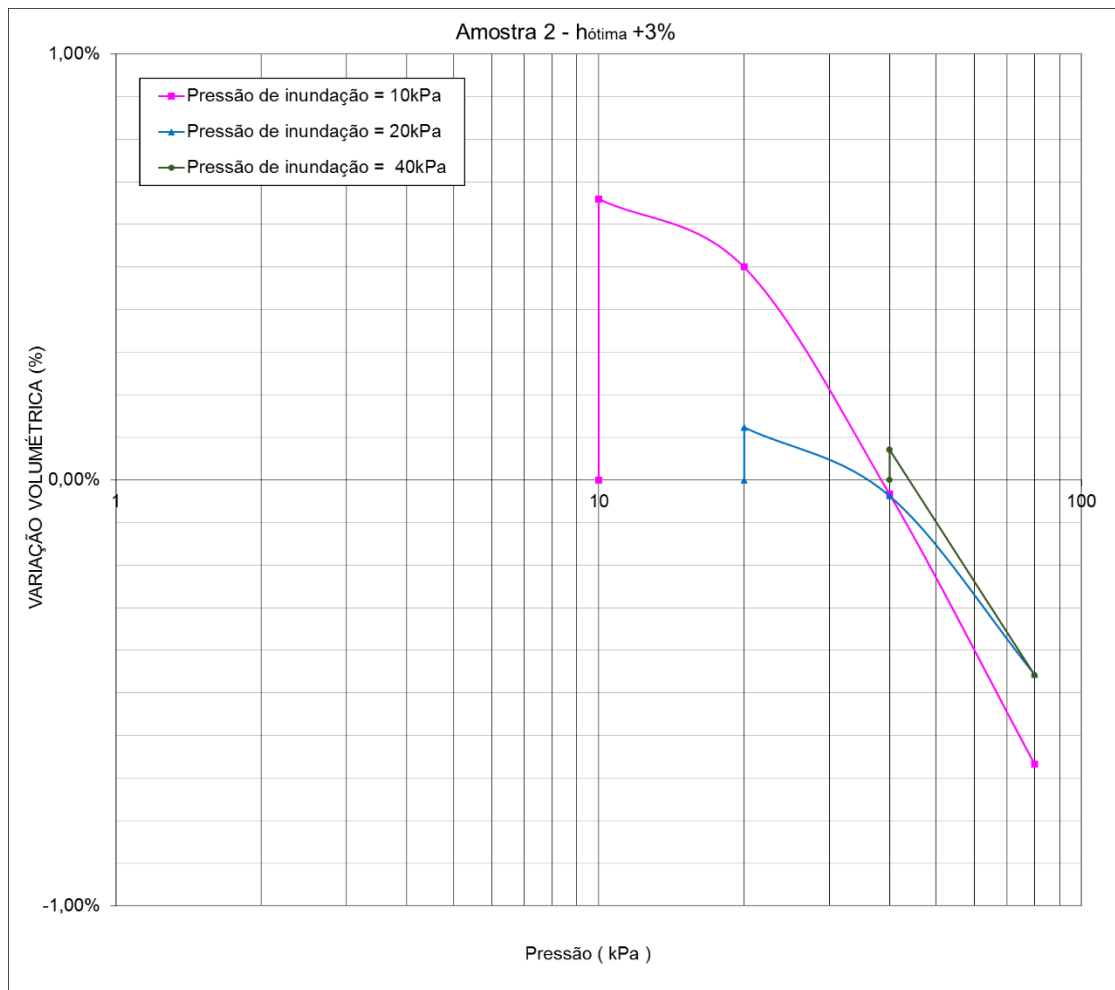
**Figura 338** – Amostra 2 – hótima - Filito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão.



Fonte: Autora.

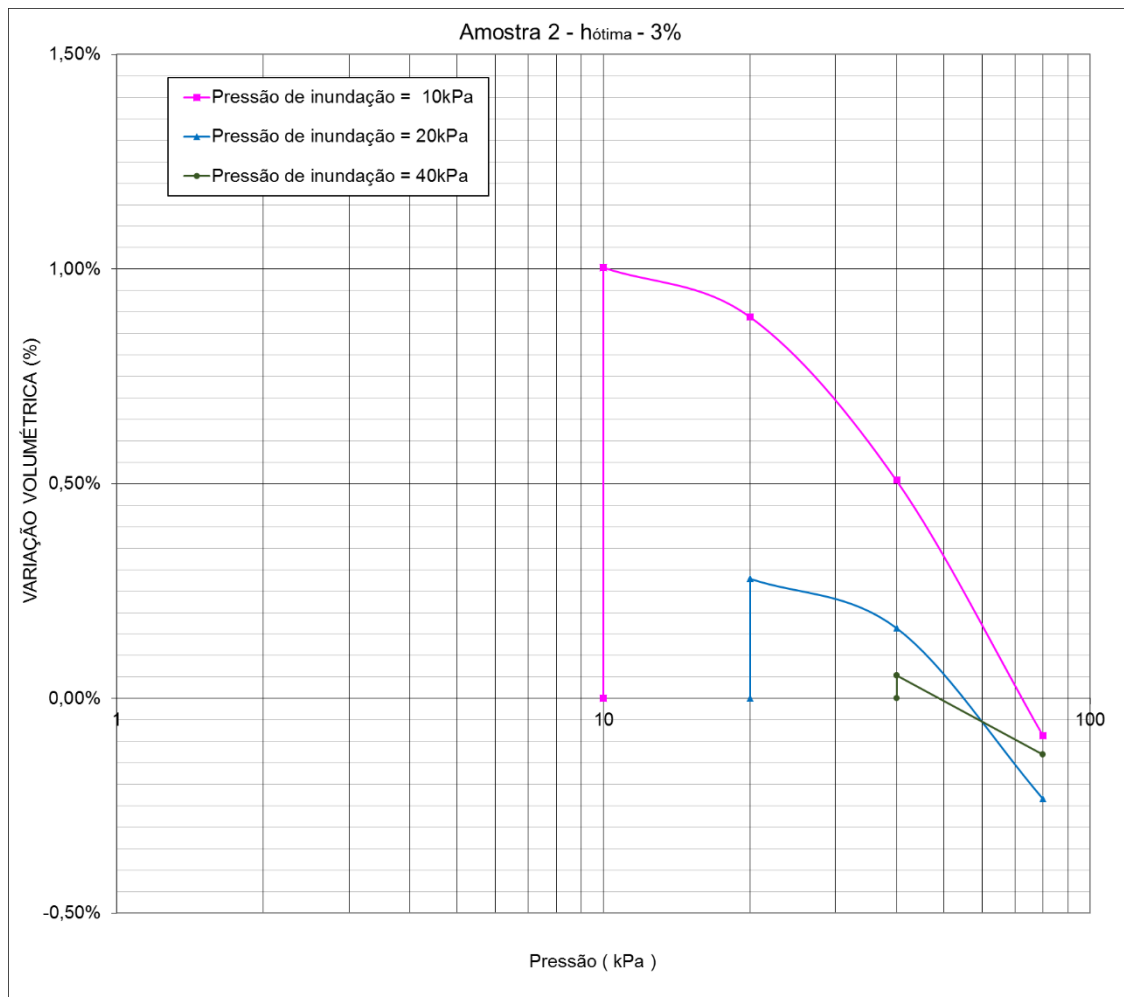


**Figura 339** – Amostra 2 –  $h_{ótima}+3\%$  - Filito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão.



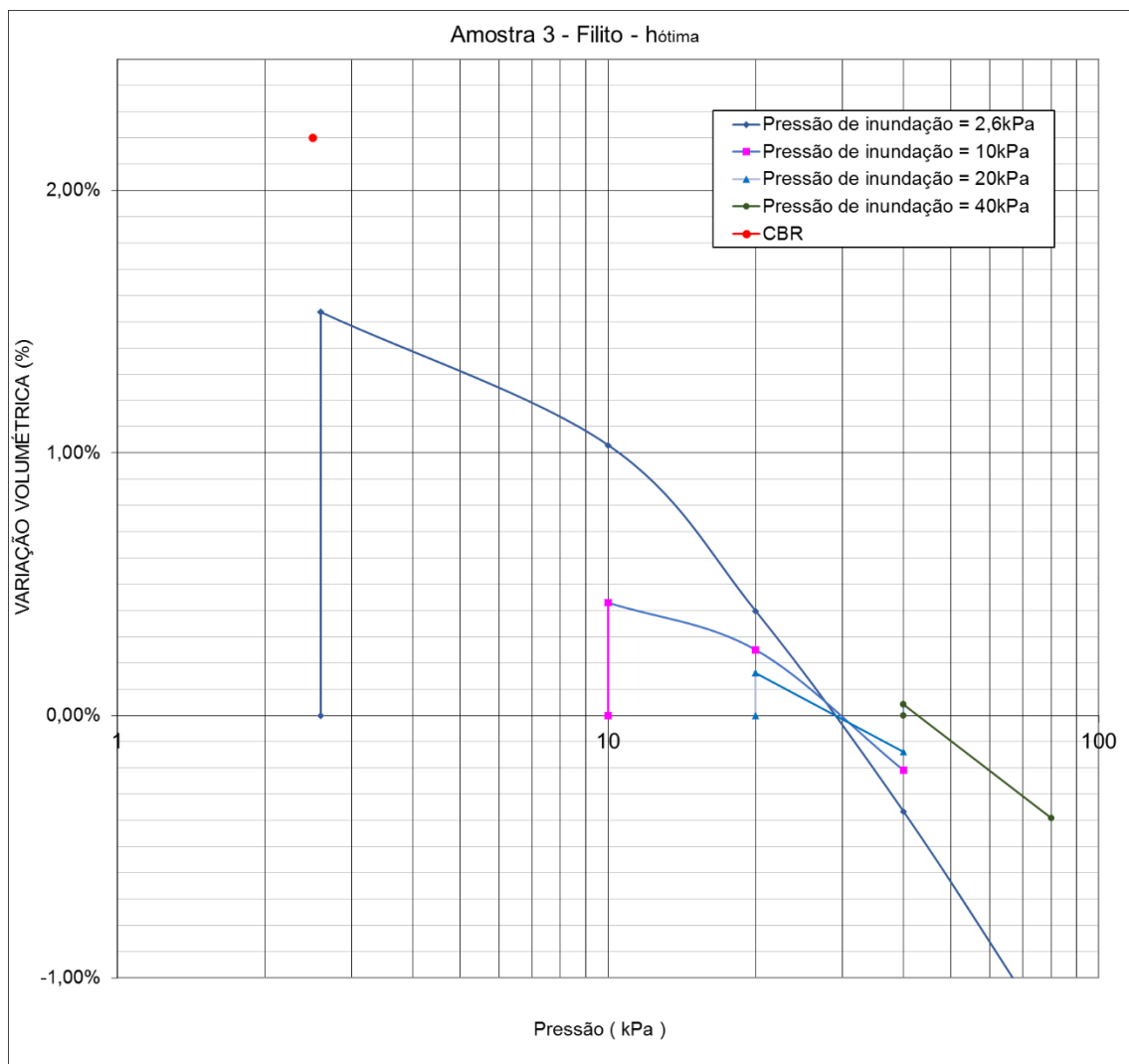
**Fonte:** Autora.

**Figura 340** – Amostra 2 – hótima-3% - Filito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão.



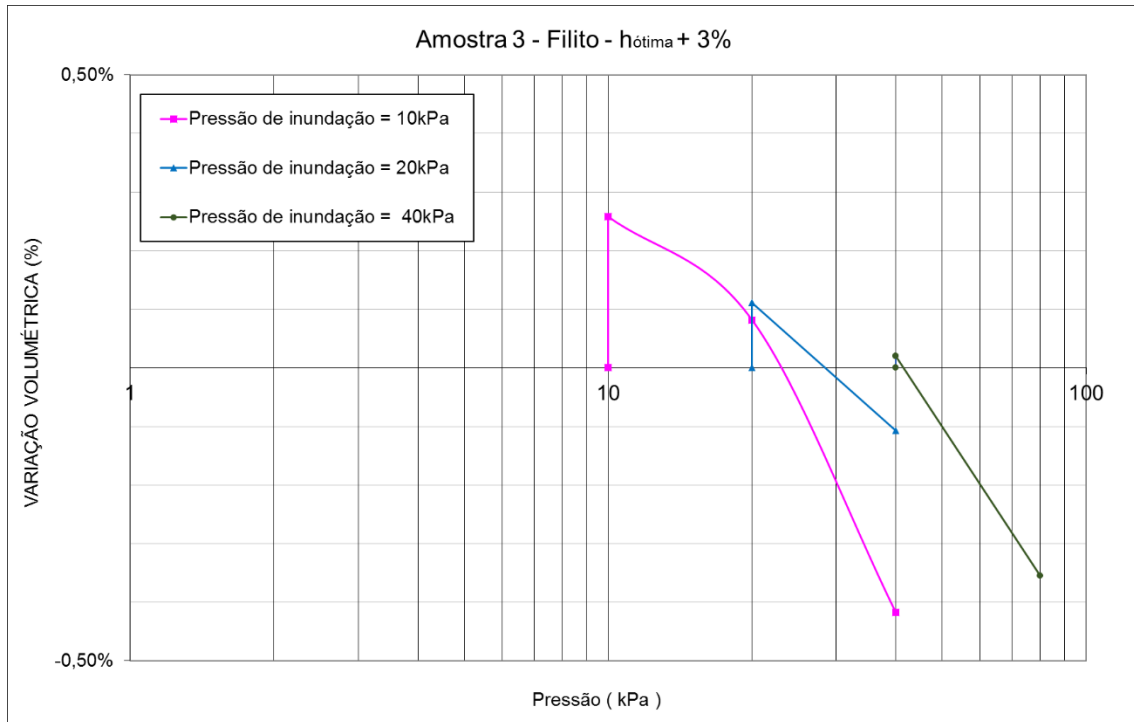
**Fonte:** Autora.

**Figura 341** – Amostra 3 – hótima - Filito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão.



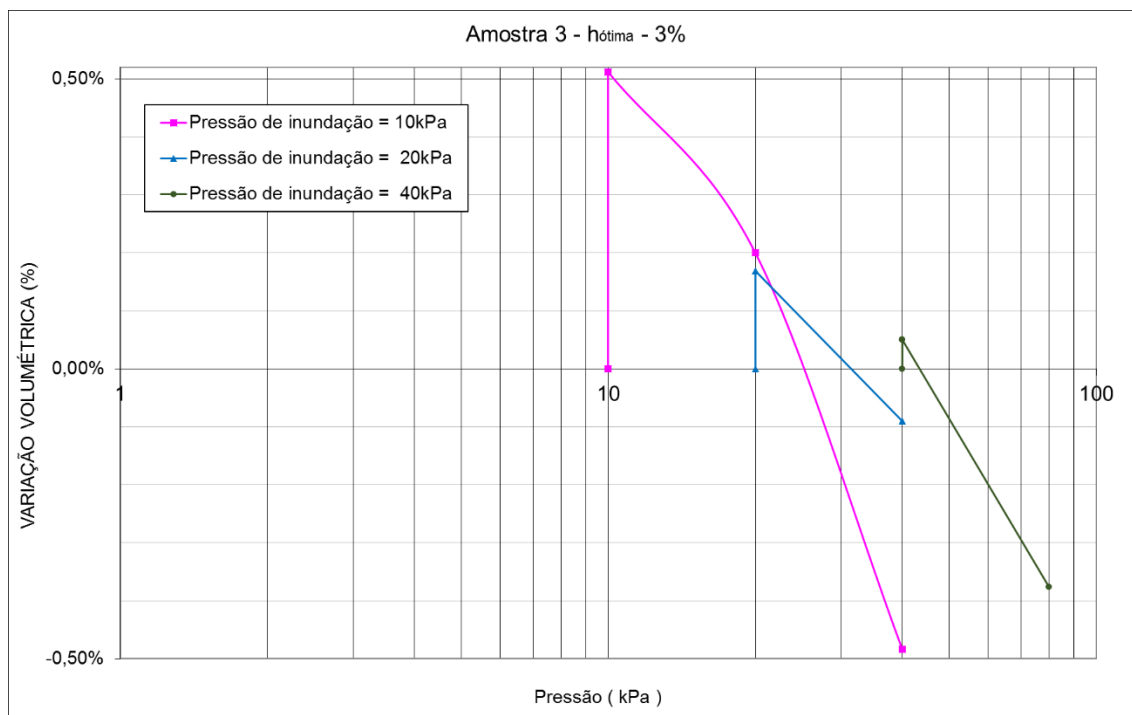
Fonte: Autora.

**Figura 342** – Amostra 3 –  $h_{ótima}+3\%$  - Filito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão.



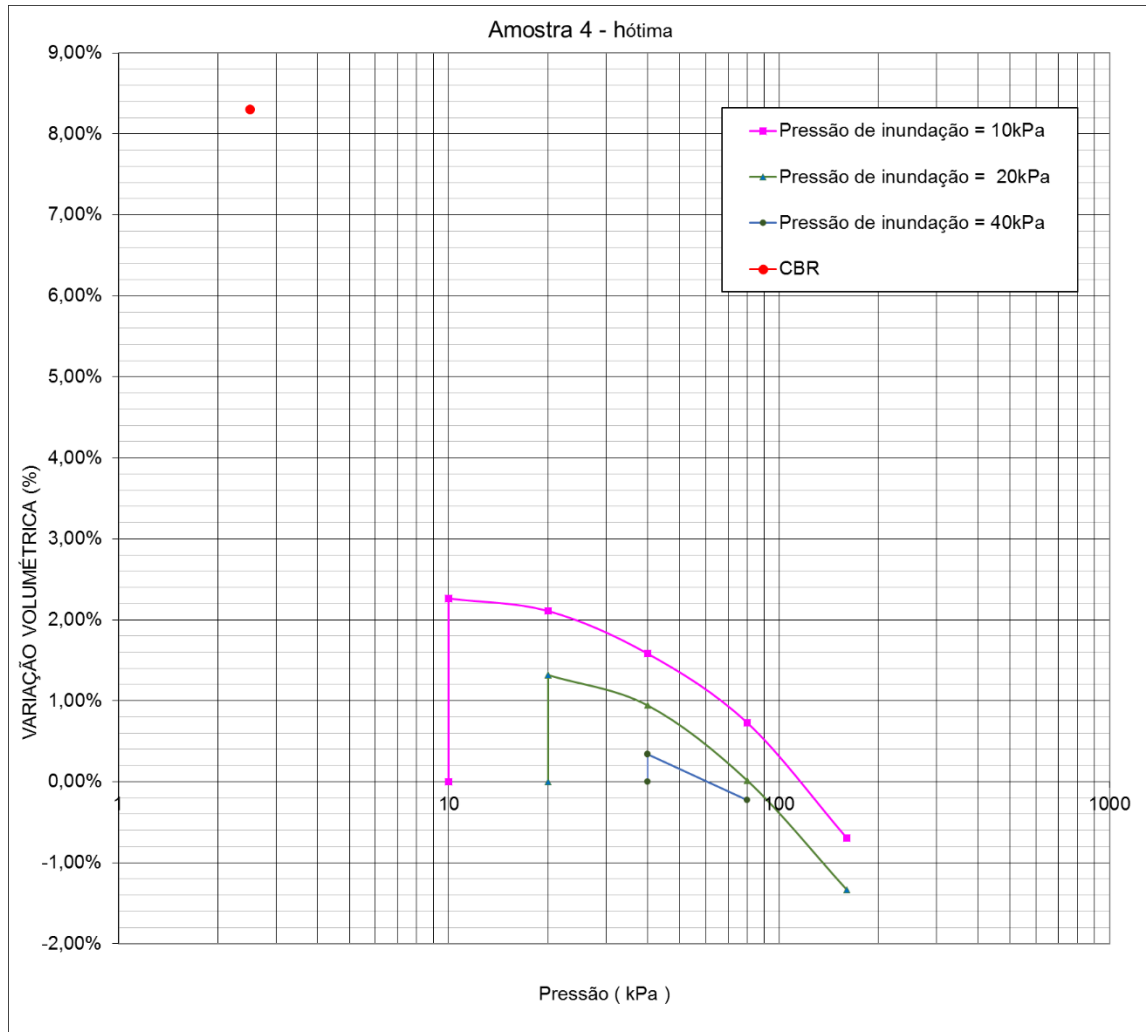
**Fonte:** Autora.

**Figura 343** – Amostra 3 – hótima-3% - Filito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão.



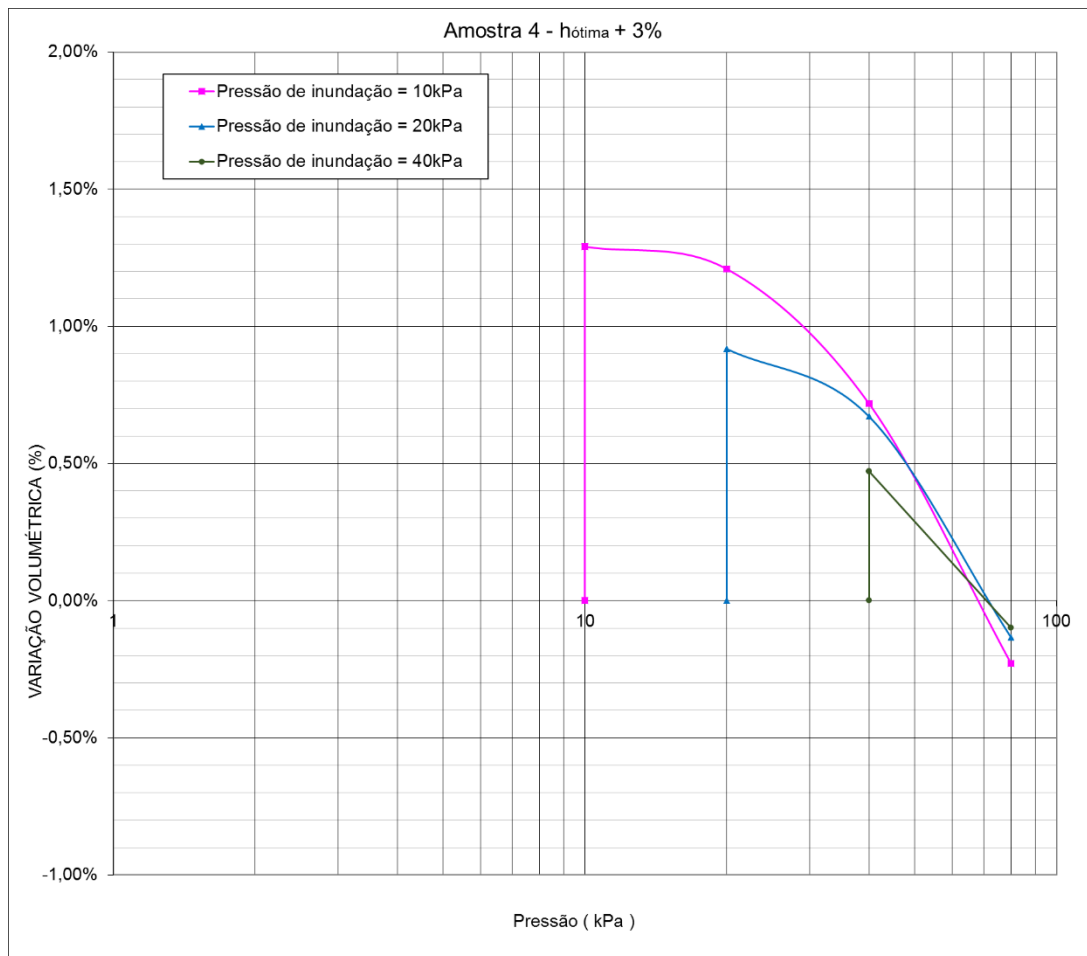
Fonte: Autora.

**Figura 344** – Amostra 4 – hótima - Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão.



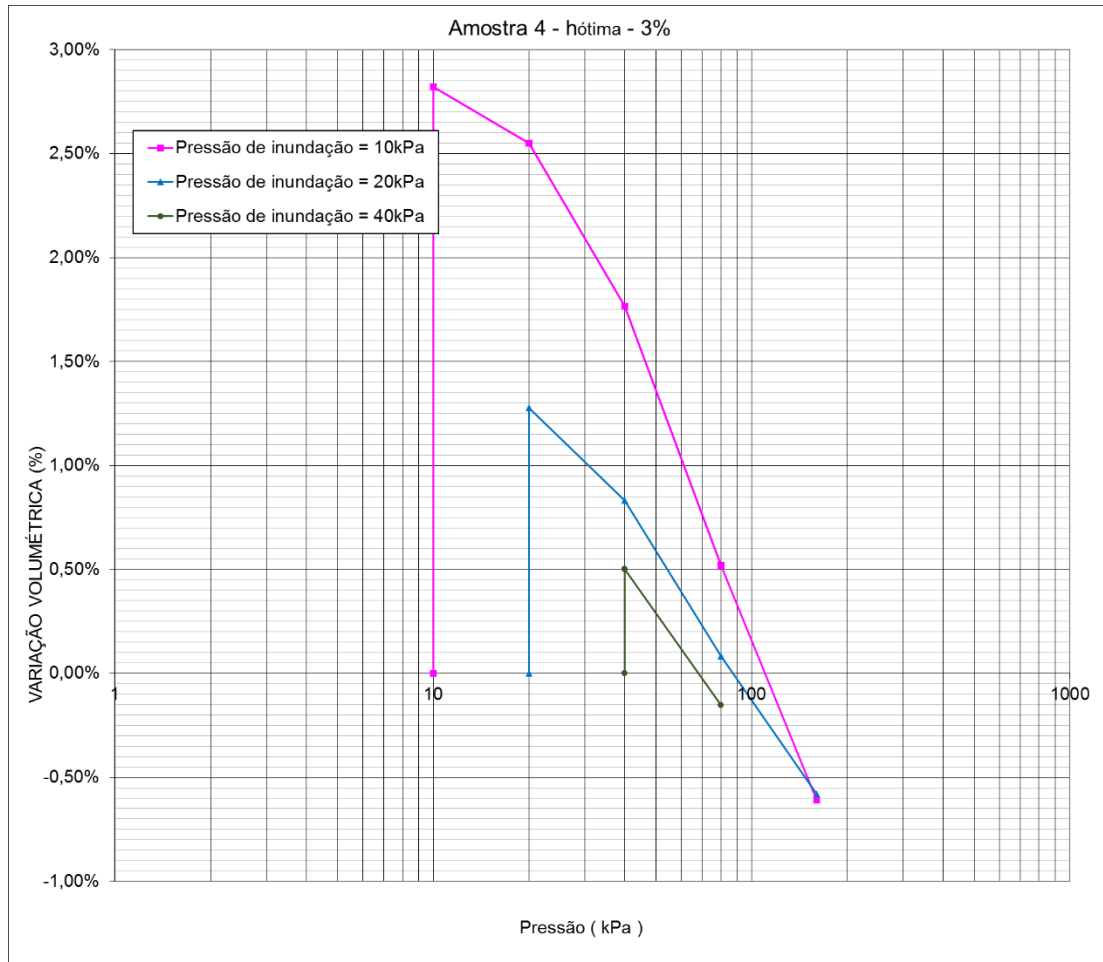
Fonte: Autora.

**Figura 345** – Amostra 4 –  $h_{ótima}+3\%$  - Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão.



Fonte: Autora.

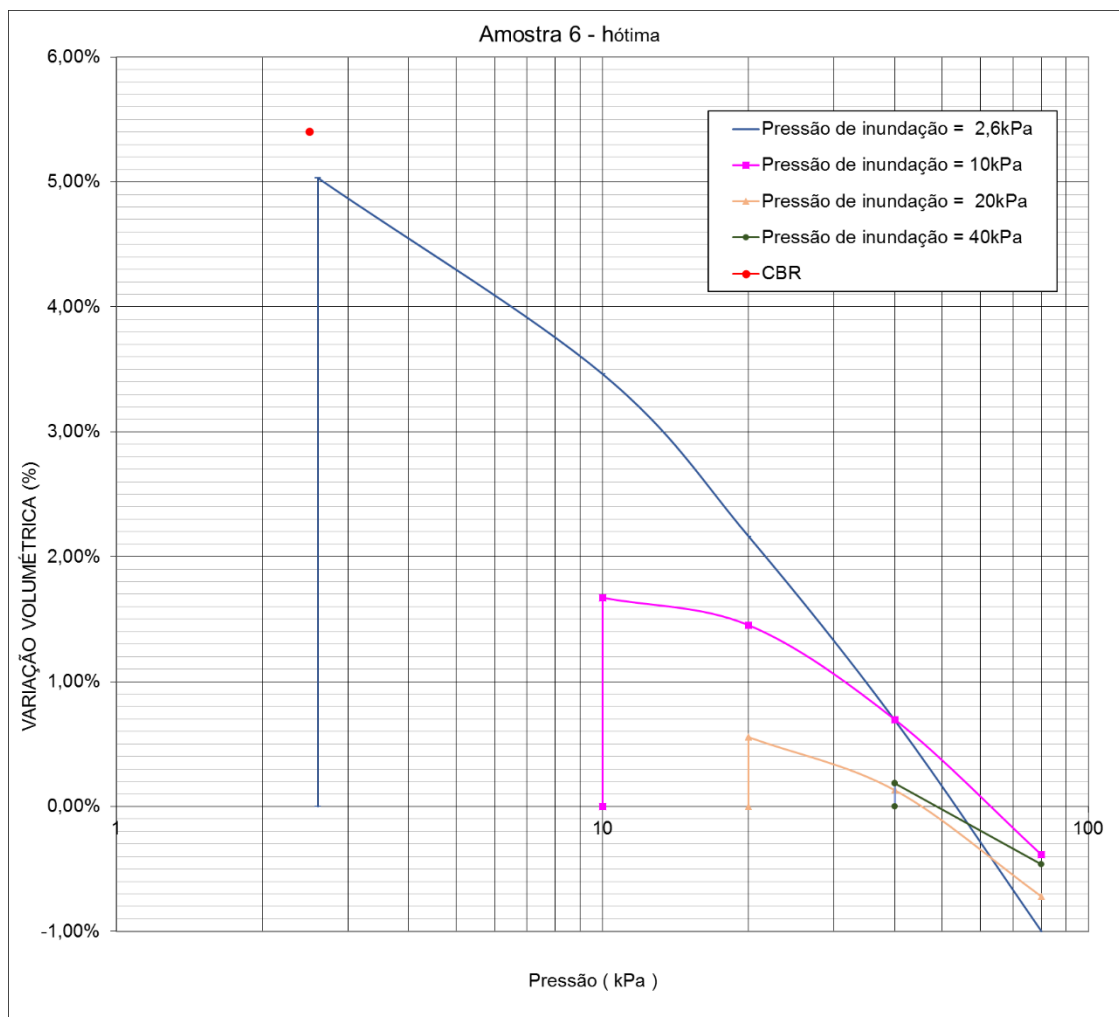
**Figura 346** – Amostra 4 –  $h_{ótima}$ -3% - Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão.



Fonte: Autora.

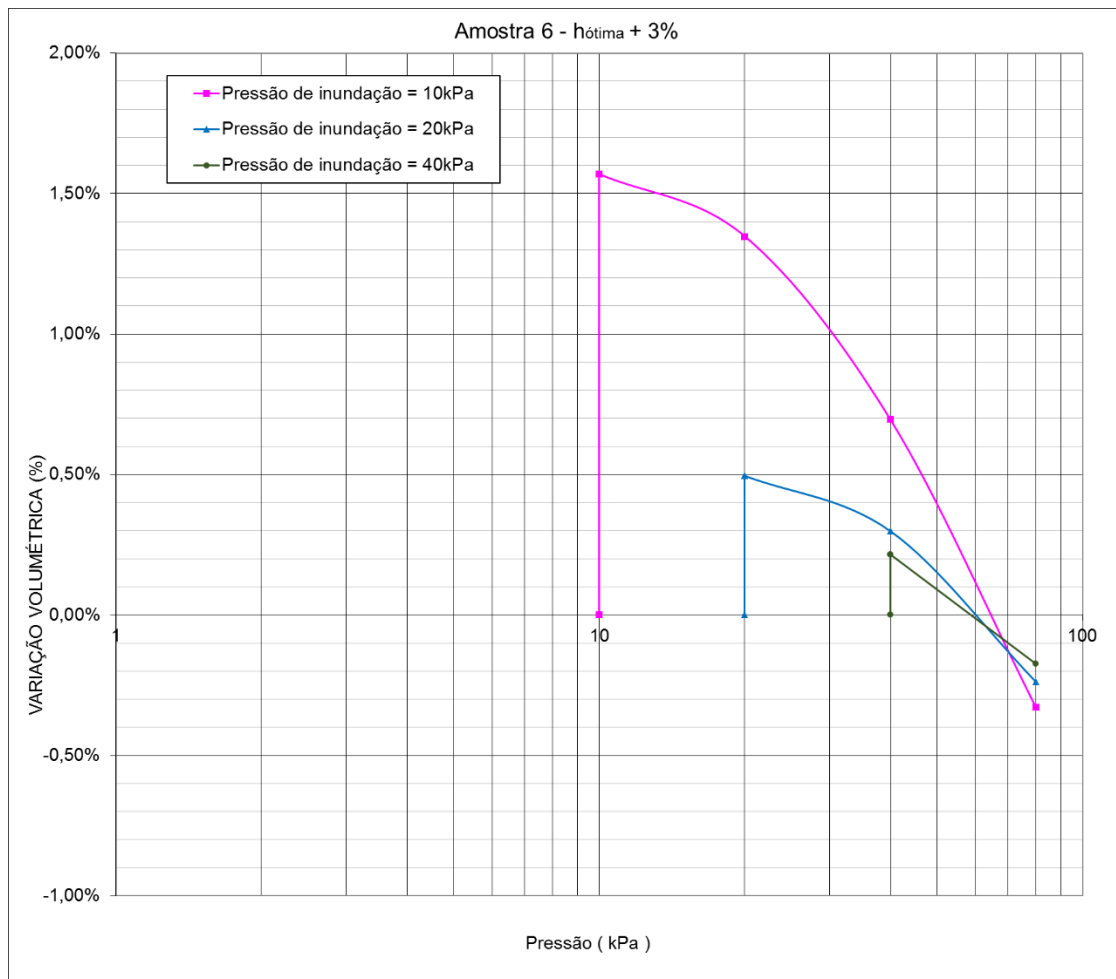


**Figura 347 – Amostra 6 – hótima - Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão.**



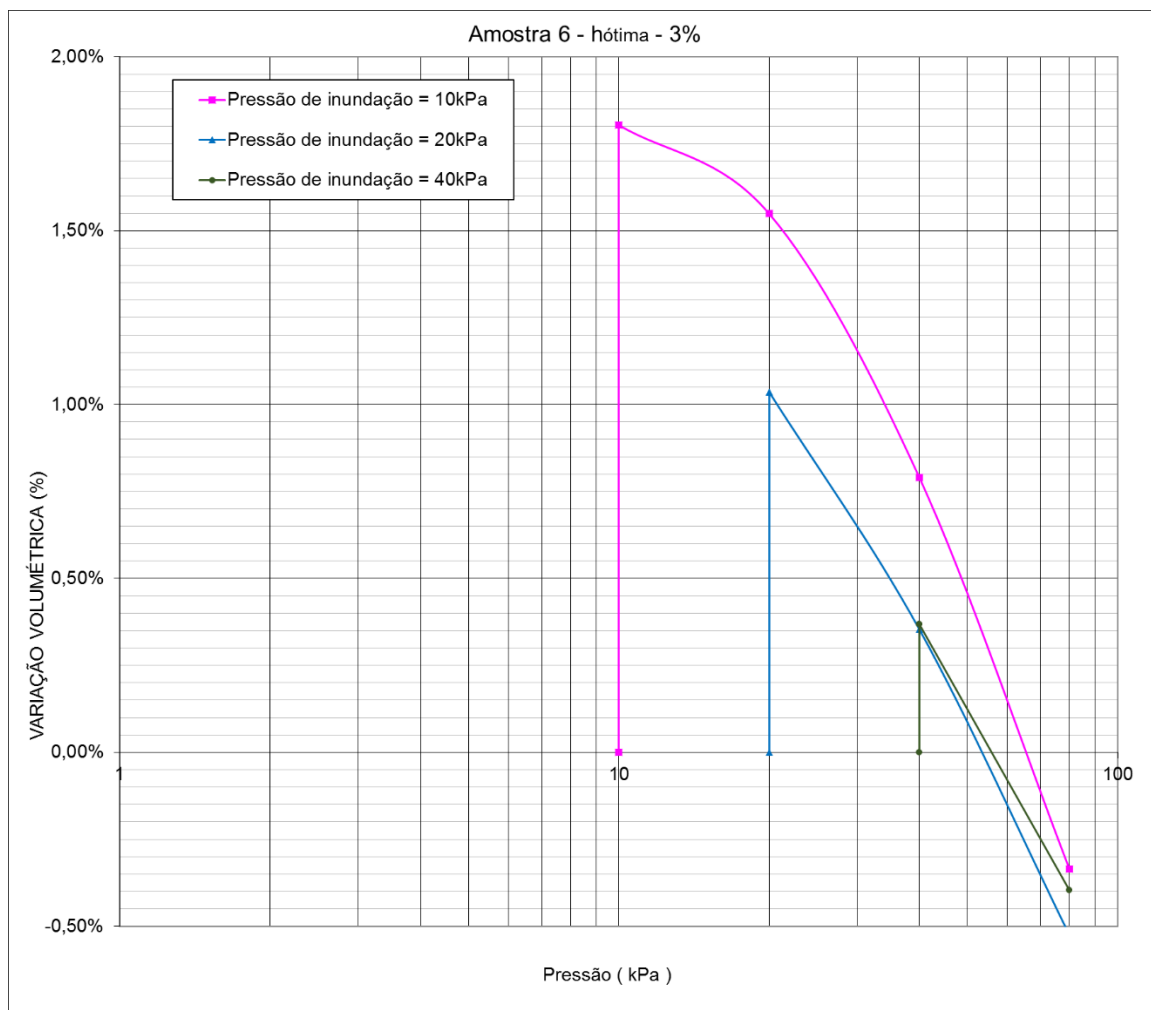
**Fonte:** Autora.

**Figura 348** – Amostra 6 –  $h_{ótima}+3\%$  - Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão.



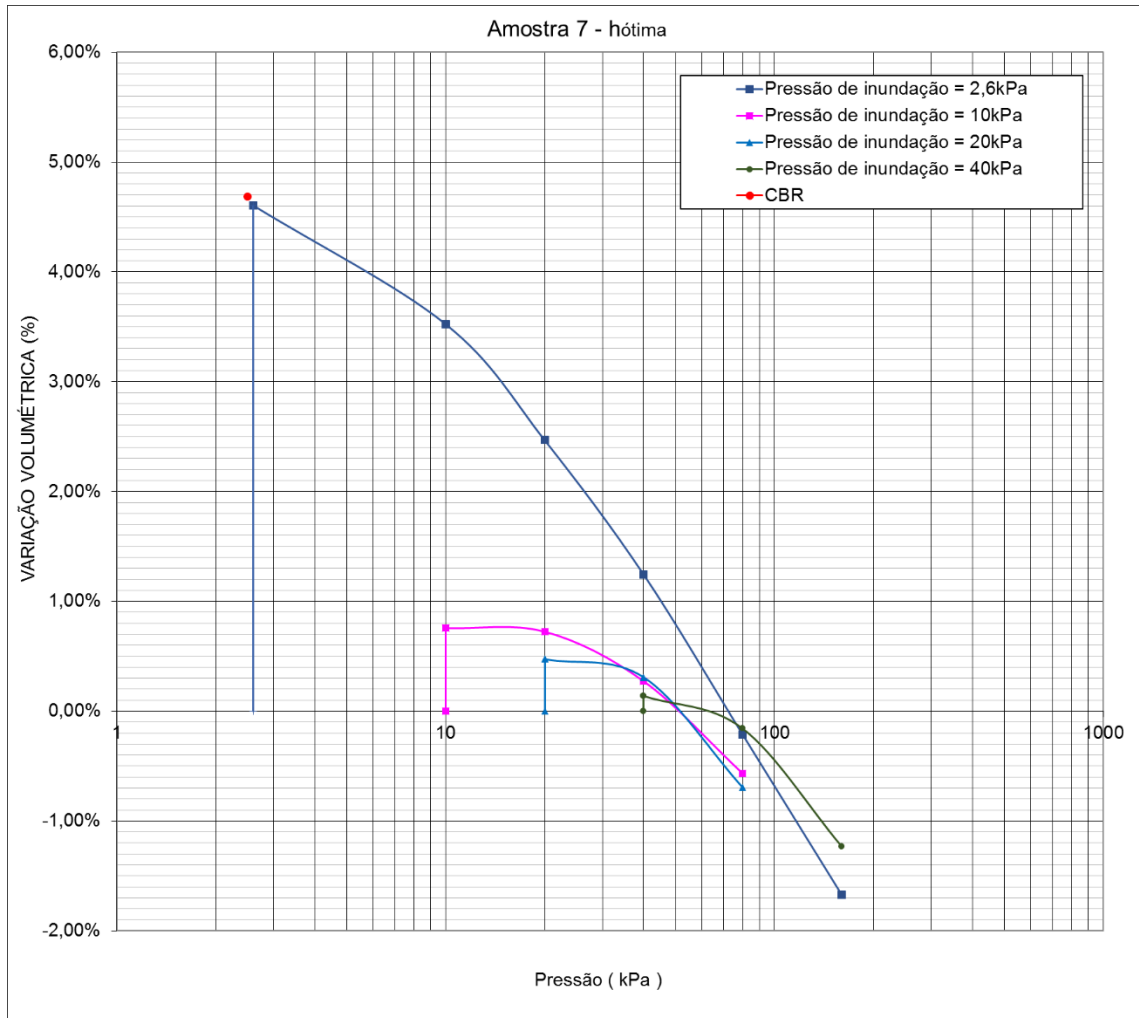
**Fonte:** Autora.

**Figura 349** – Amostra 6 –  $h_{ótima}$ -3% - Ultramilonito – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão.



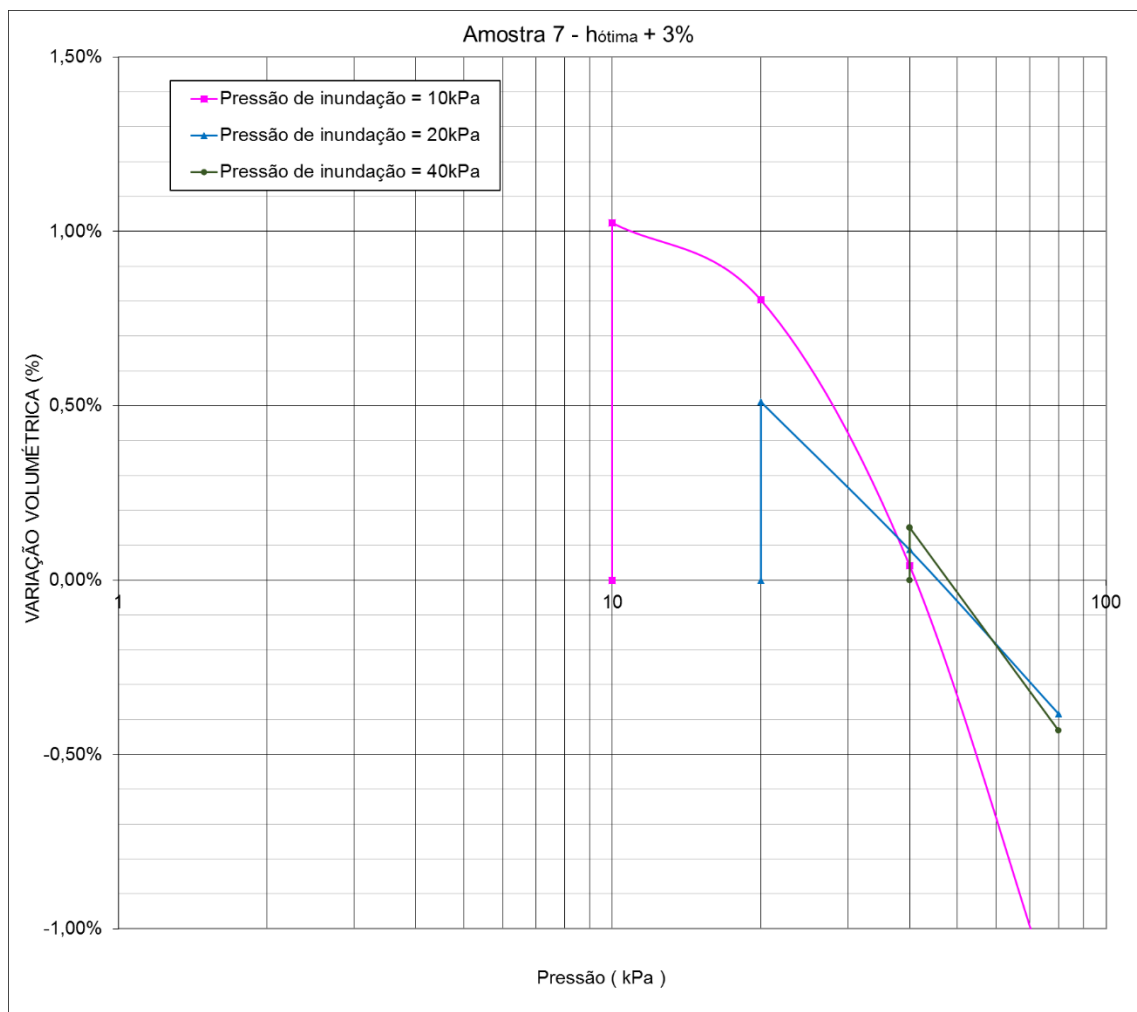
Fonte: Autora.

**Figura 350** – Amostra 7 – hótima – Granito pouco milonitizado – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão.



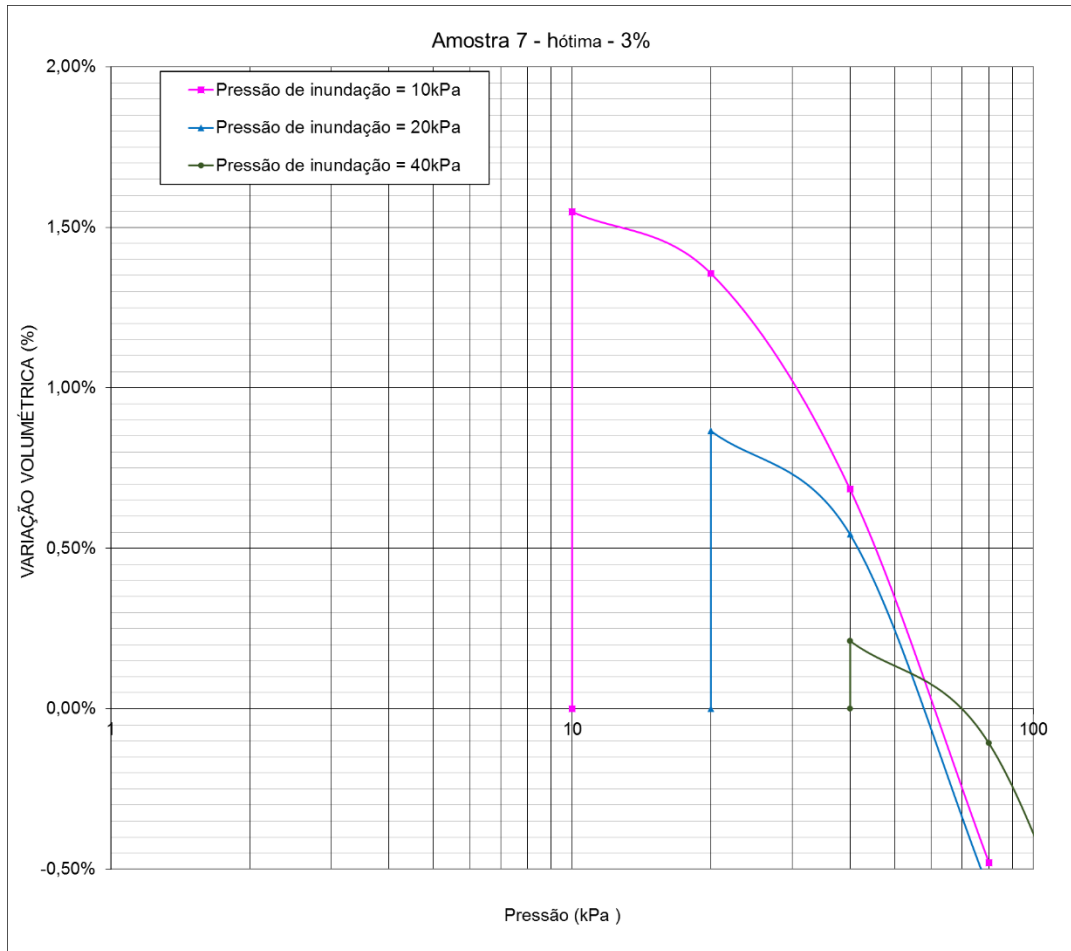
Fonte: Autora.

**Figura 351** – Amostra 7 –  $h_{ótima}+3\%$  – Granito pouco milonitizado – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão.



Fonte: Autora.

**Figura 352** – Amostra 7 – hótima-3% – Granito pouco milonitizado – Ensaio de adensamento edométrico para obter pressão de expansão.



**Fonte:** Autora.